

振动和振动测试

的

基础知识

Y 向信号: $A_y \sin(2\pi f_y t)$

X 向信号: $A_x \sin(2\pi f_x t + \theta)$

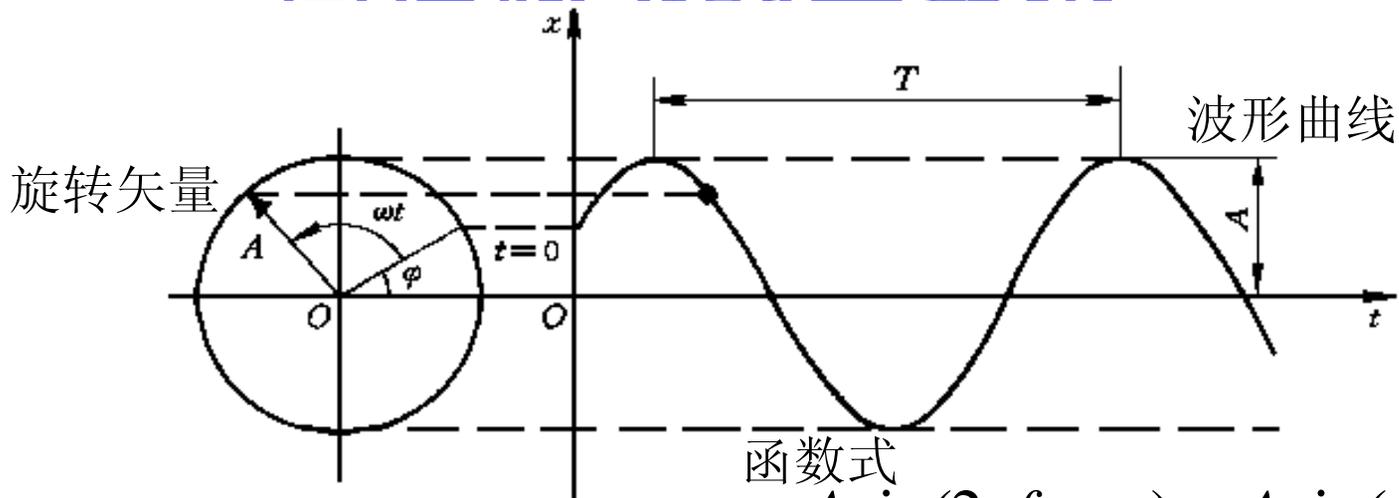


内 容 提 要

- 简谐振动三要素
振幅、频率和初相位
振动位移、速度和加速度
- 振动波形
- 频率分析和频谱图
- 振动系统的模态特性
固有频率、阻尼比
- 自由振动与强迫振动
共振
- 旋转机械振动的测量
- 传感器原理及其选用
- 基频分量的幅值和相位
- 振动相位的测量
- 旋转机械的振动图示
- 定转速：波形图、频谱图
- 变转速：波德图和极坐标图
三维频谱图



简谐振动的三要素



$$x = A \sin(2\pi f t + \varphi) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

- **振幅 A (Amplitude)**

偏离平衡位置的最大值。描述振动的规模。

- **频率 f (Frequency)**

描述振动的快慢。单位为次/秒(Hz) 或次/分(c/min)。

周期 $T = 1/f$ 为每振动一次所需的时间，单位为秒。

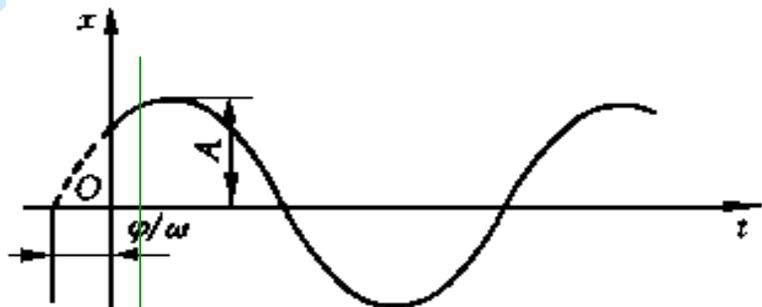
圆频率 $\omega = 2\pi f$ 为每秒钟转过的角度，单位为弧度/秒

- **初相角 φ (Initial phase)**

描述振动在起始瞬间的状态。

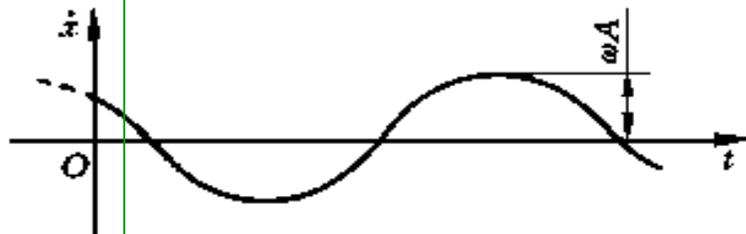


位移、速度、加速度之间的关系



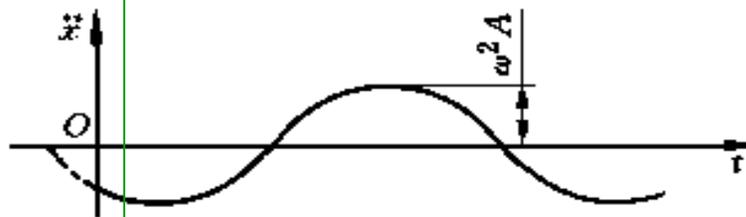
位移 (Displacement)

$$x = A \sin(\omega t + \varphi)$$



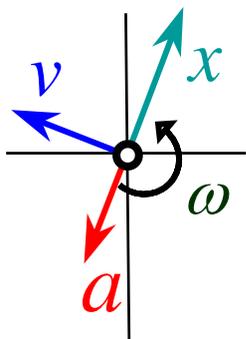
速度 (Velocity)

$$v = A \omega \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2})$$



加速度 (Acceleration)

$$a = -A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi + \pi)$$



- 位移、速度、加速度都是同频率的简谐波。
- 三者的幅值相应为 A 、 $A\omega$ 、 $A\omega^2$ 。
- 相位关系：加速度领先速度 90° ；速度领先位移 90° 。

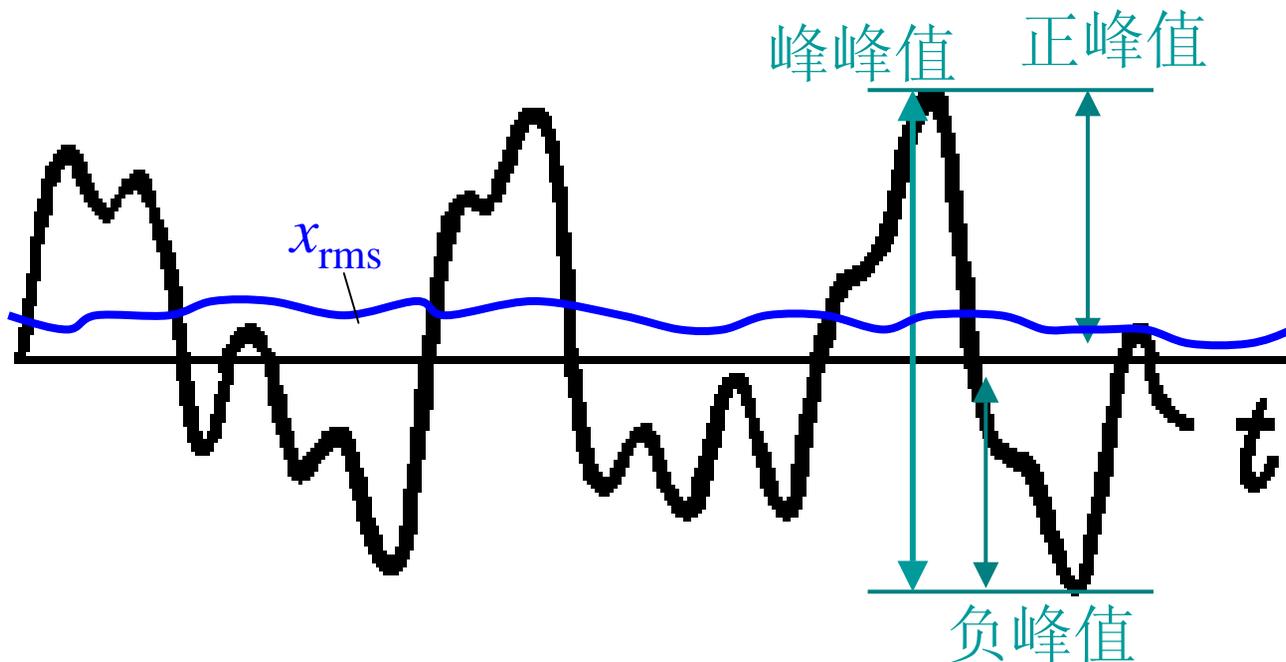


各种振动的时域波形

名称	波形	名称	波形
简谐振动		合成衰减振动	
周期振动		冲击过程	
合成振动		正弦扫描	
拍		窄带随机	
衰减振动		宽带随机	



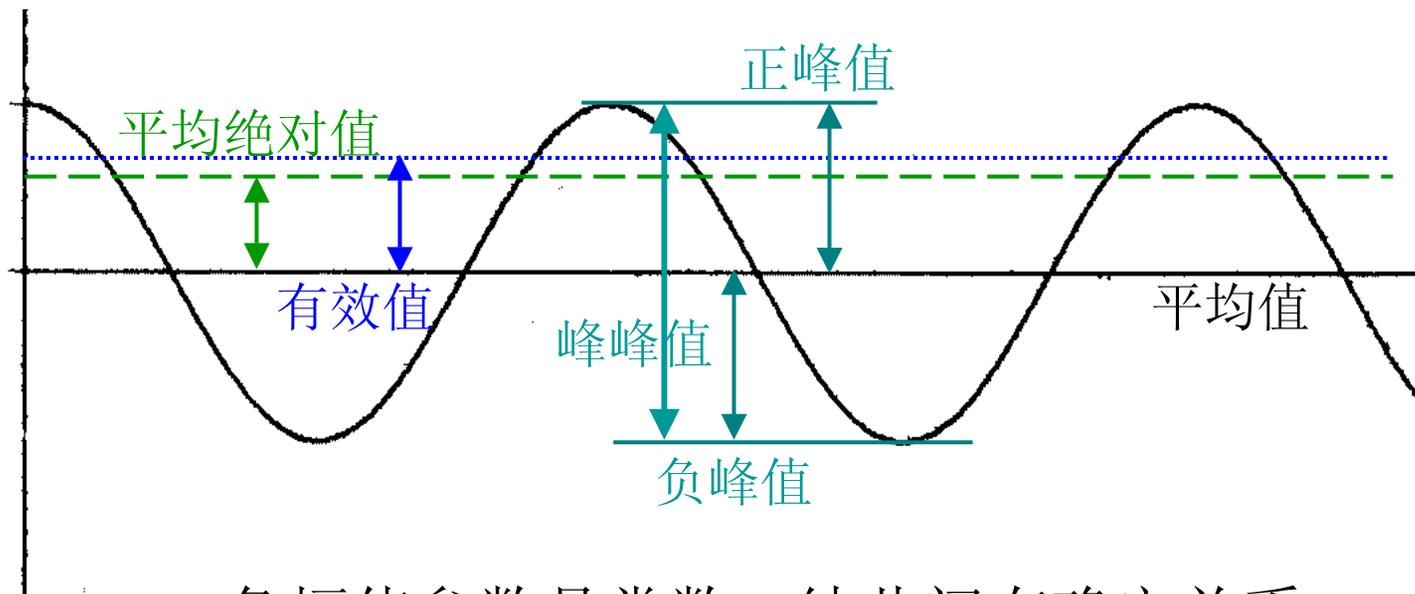
复杂振动的幅值参数



各幅值参数随时间变化，彼此间无明确确定关系



简谐振动的幅值参数



各幅值参数是常数，彼此间有确定关系

- **峰值** $x_p=A$; **峰峰值** $x_{p-p}=2A$
- **平均绝对值** $x_{av}=0.637A$
- **有效值** $x_{rms}=0.707A$
- **平均值** $\bar{x}=0$



常用的幅值参数及其单位

- **位移**

峰峰值，单位为微米（ μm ）

- **速度**

有效值，又称烈度，单位为毫米/秒（ mm/s ）

- **加速度**

峰值，单位为米/秒²（ m/s^2 ）



振动信号的频率分析

- 把振动信号中所包含的各种频率成分分别分解出来的方法。
- 频率分析的数学基础是傅里叶变换和快速傅里叶算法（FFT）。
- 频率分析可用频率分析仪来实现，也可在通用计算机上用软件来完成。
- 频率分析的结果得到各种频谱图，这是故障诊断的有力工具。

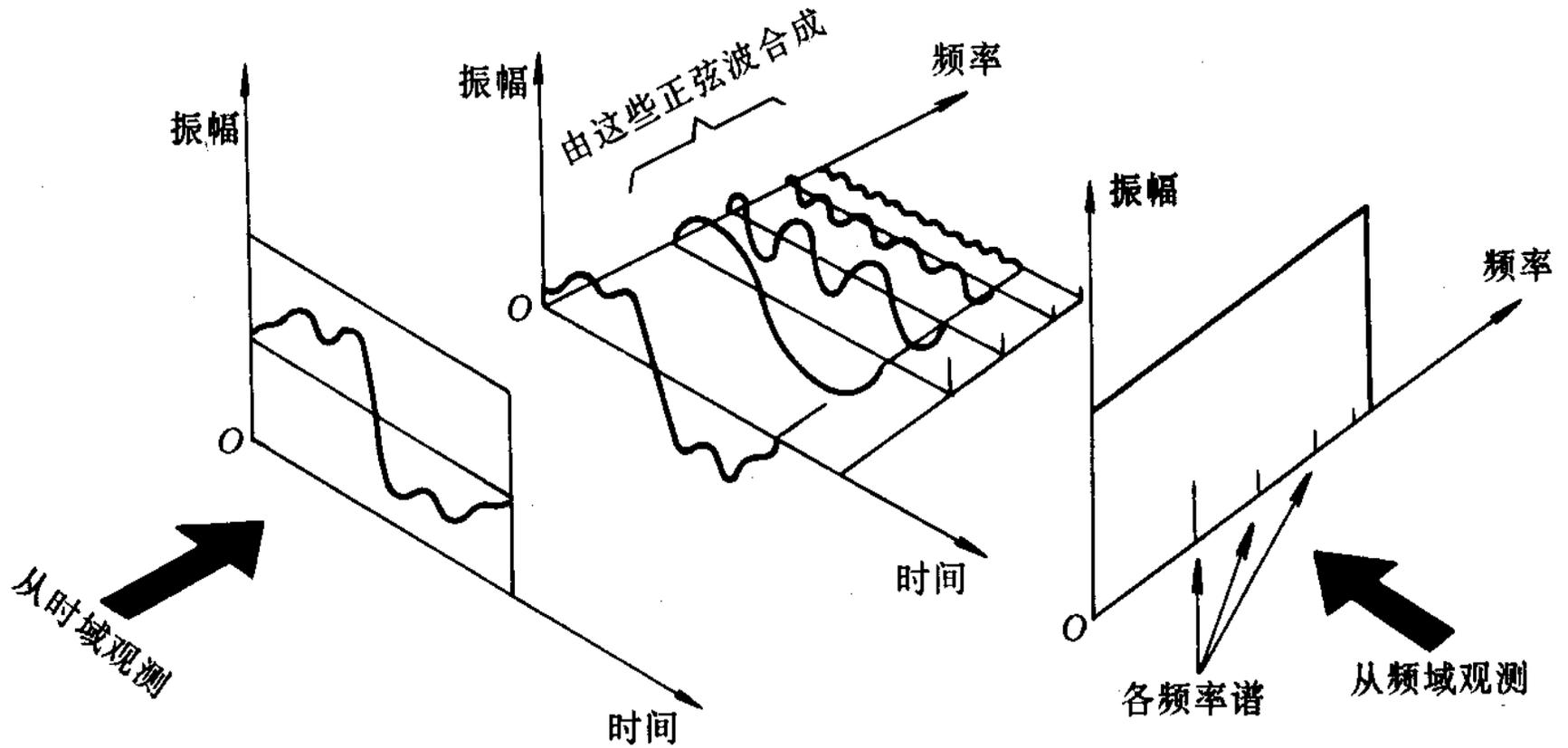


各种振动的频谱图

名称	波形	频谱	名称	波形	频谱
简谐振动			合成衰减振动		
周期振动			冲击过程		
合成振动			正弦扫描		
拍			窄带随机		
衰减振动			宽带随机		



时间域 $\begin{matrix} \text{FFT} \\ \longleftrightarrow \\ \text{IFFT} \end{matrix}$ 频率域





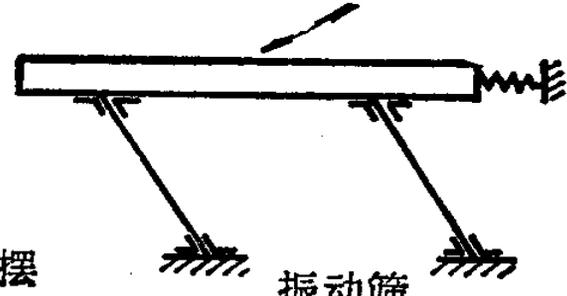
简单的振动系统



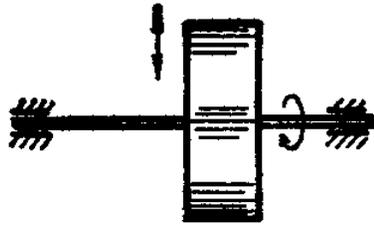
弹性支承的机器



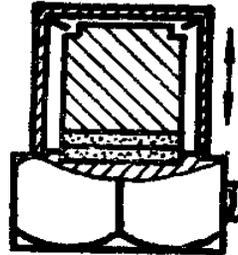
扭摆



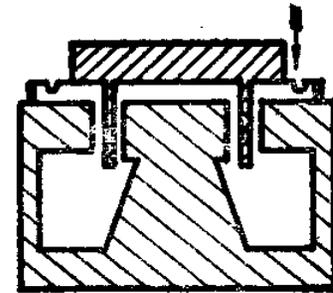
振动筛



单盘转子



压电式加速度计



电动振动台

* 以单自由度振动系统为例



振动系统的模态特性

振动系统的模态特性有两个参数

- 固有频率 f_n （或 ω_n ），单位 Hz

决定于振动系统的质量和刚度

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- 阻尼比 ζ ，无量纲

决定于振动系统的阻尼

$\zeta < 1$ 称小阻尼； $\zeta > 1$ 称大阻尼

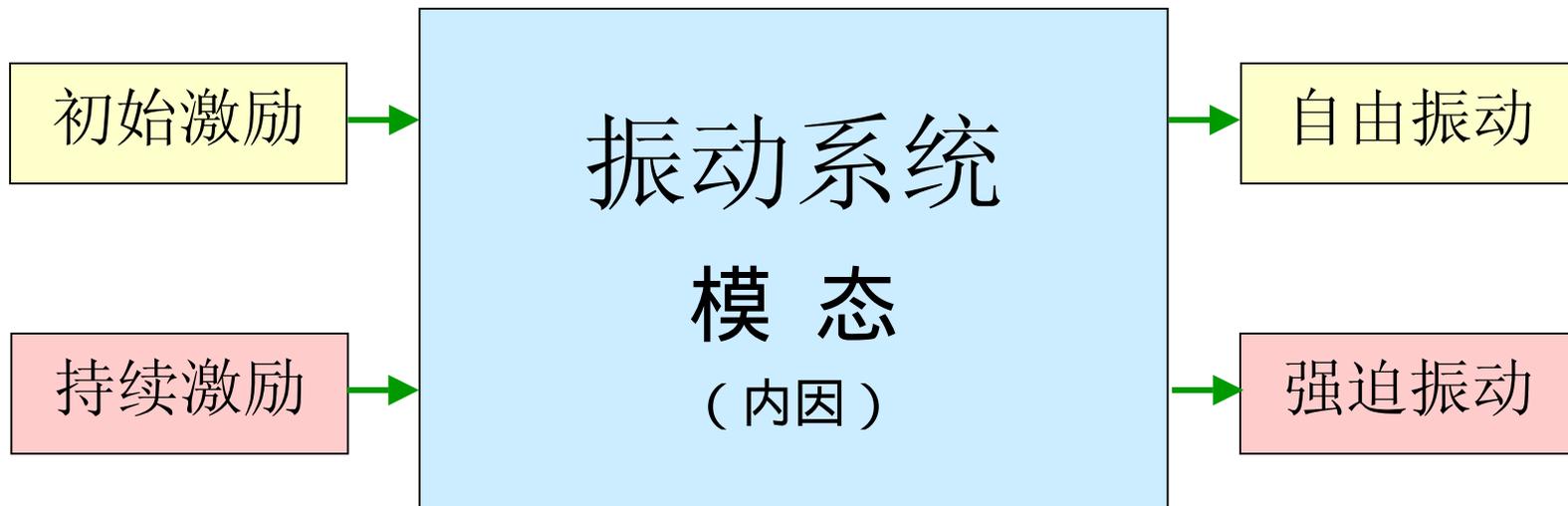
* 以单自由度振动系统为例。多自由度系统有多个模态。



振动系统对激励的响应

激励
(外因)

响应
(结果)



- 由初始激励引起的响应，称为自由振动。
- 由持续激励引起的响应，称为强迫振动。
- 从响应中能看出系统的特性。

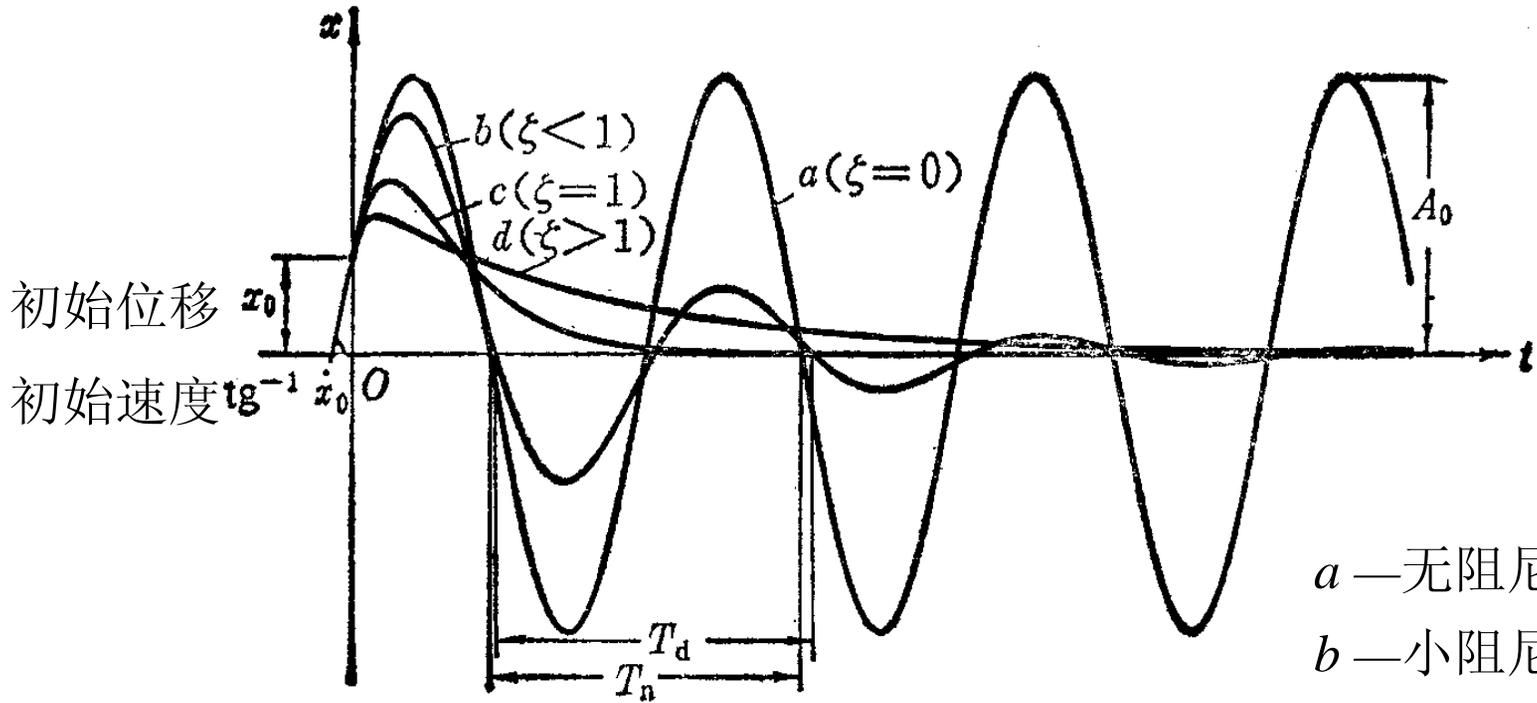


自由振动的特点

- 振动的频率等于系统的固有频率。
- 振幅大小决定于初始激励（初始位移和初始速度）。
- 系统的阻尼比大，振幅衰减快；
阻尼比小，振幅衰减慢。



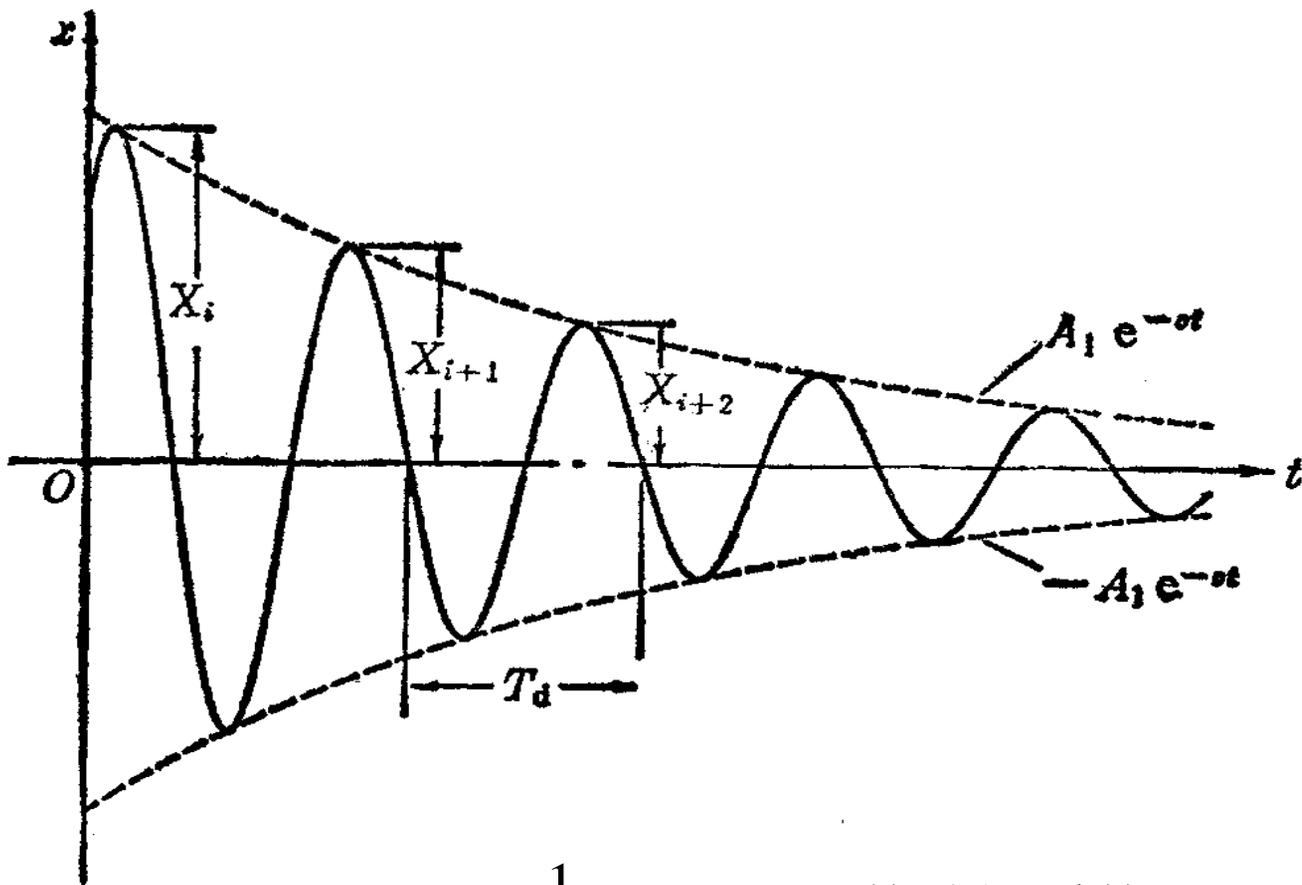
不同阻尼比的自由振动



- a — 无阻尼
- b — 小阻尼
- c — 临界阻尼
- d — 大阻尼



由自由振动确定模态参数



阻尼固有频率 $f_d = \frac{1}{T_d}$

对数减幅系数 $\delta = \ln \frac{X_i}{X_{i+1}}$

无阻尼固有频率 $f_n = \frac{f_d}{\sqrt{1-\zeta^2}}$

阻尼比 $\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}$

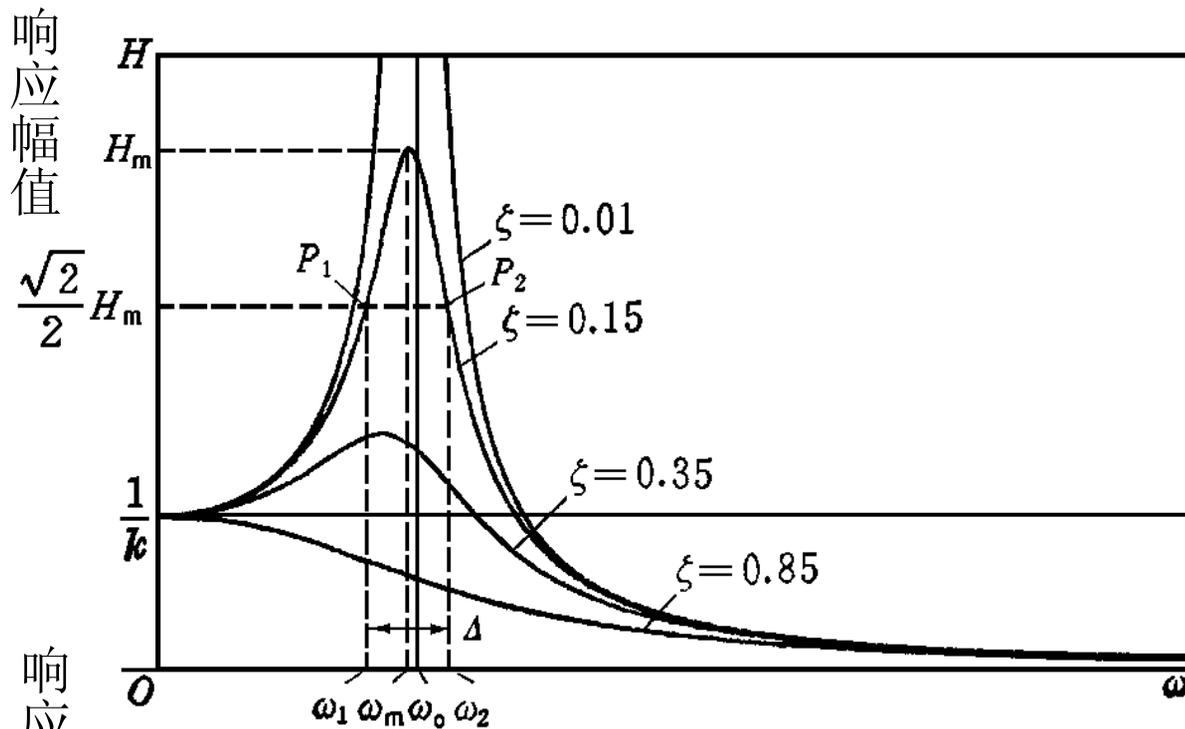


强迫振动的特点

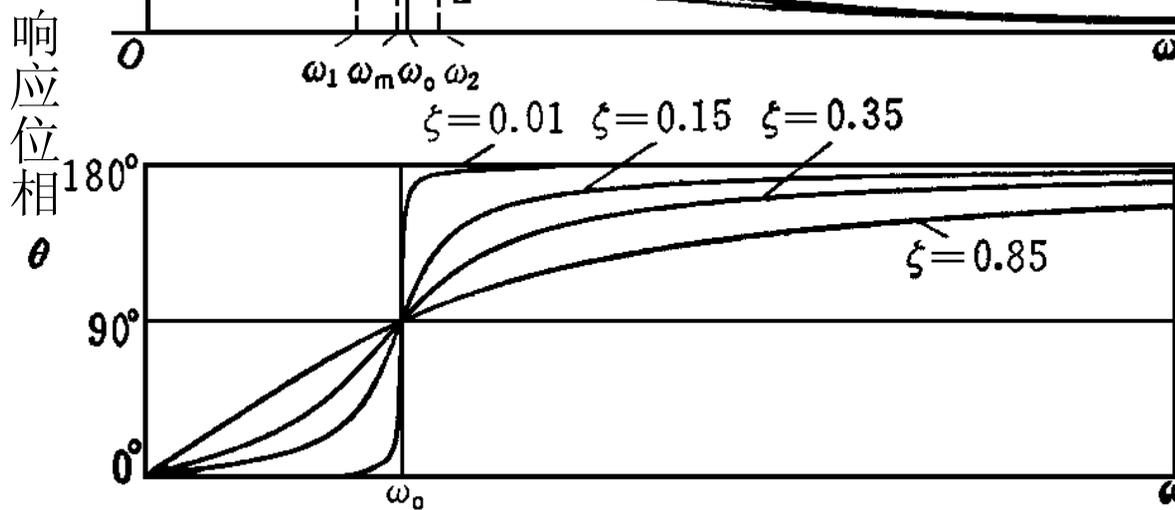
- 振动的频率等于激励的频率。
- 振幅与激励的强弱成正比。
- 激励频率接近固有频率时，发生共振现象。
- 阻尼小，共振峰高；阻尼大，共振峰低。
- 位相上说，振动落后于激励。
- 振幅和位相随激励频率而变化，变化规律用系统的幅频特性和相频特性来表示。



幅频曲线和相频曲线



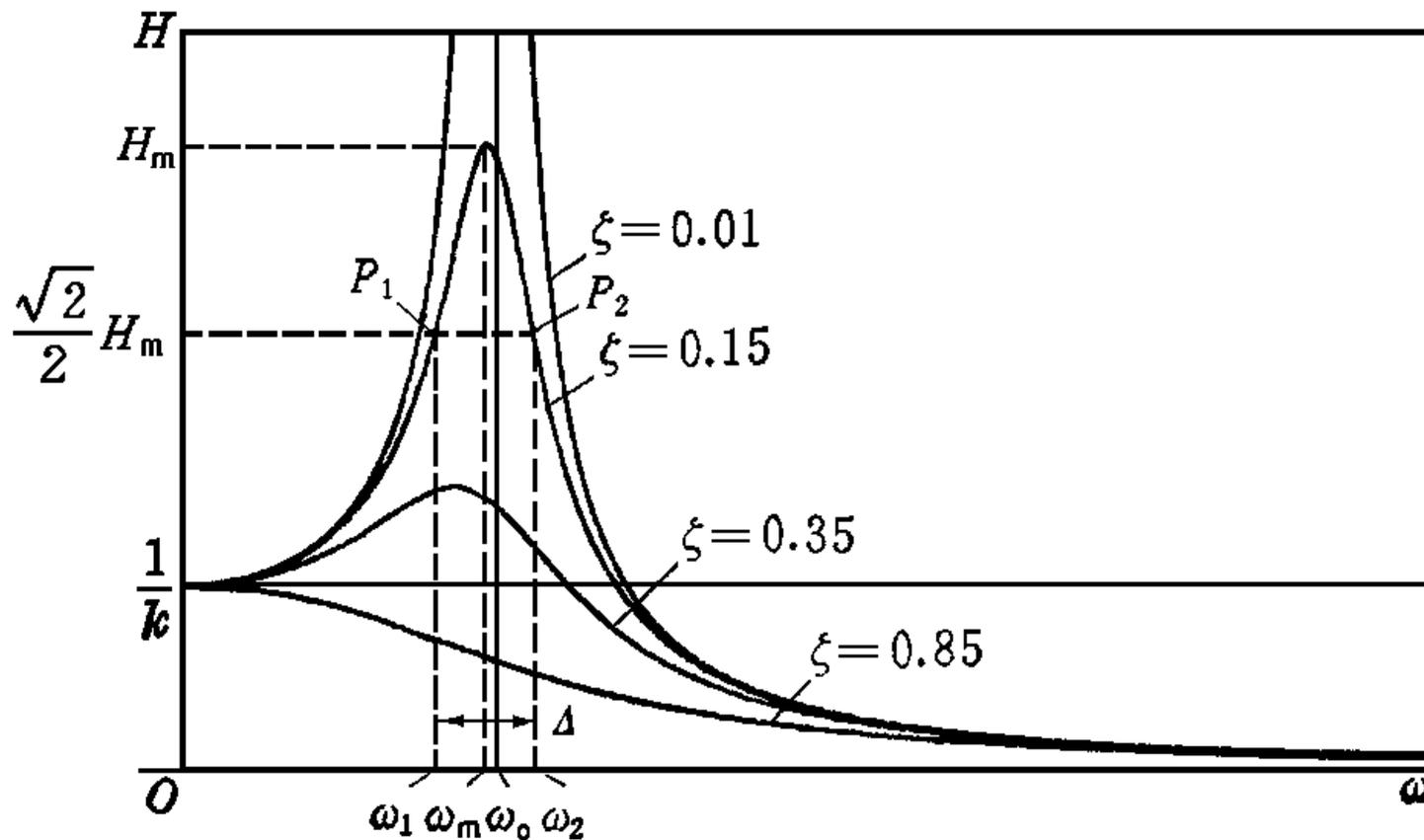
幅频曲线
(共振曲线)



相频曲线



由强迫振动确定模态参数



共振频率 $\omega_m = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$

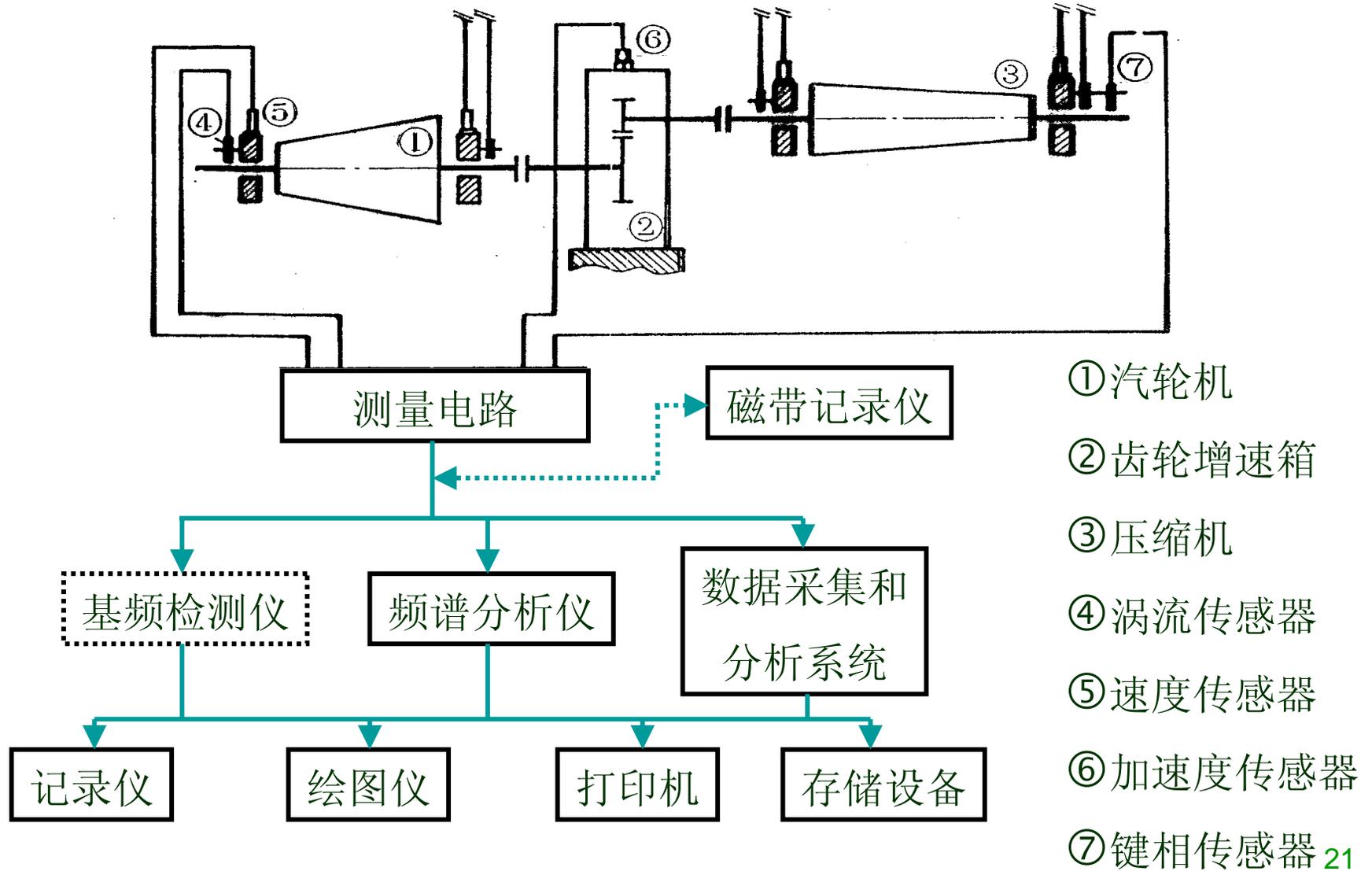
半功率带宽 $\Delta = \omega_2 - \omega_1$

固有频率 $f_n = \frac{\omega_m}{2\pi\sqrt{1 - 2\zeta^2}}$

阻尼比 $\zeta \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n}$

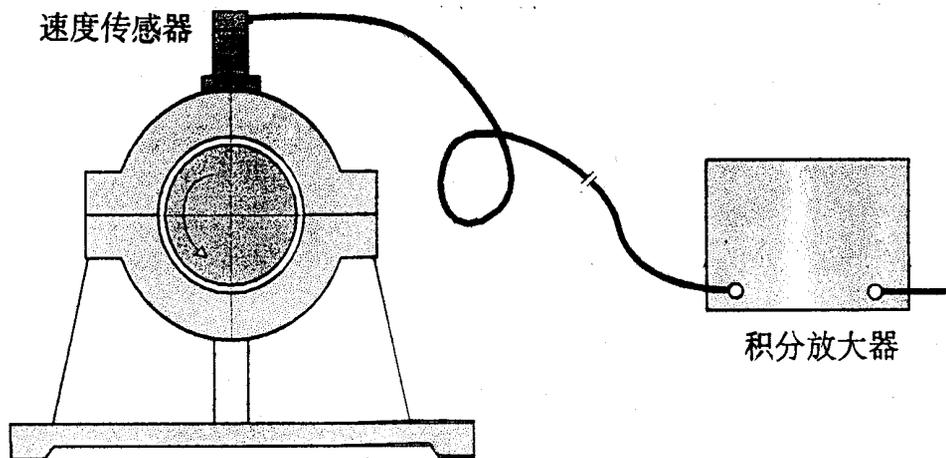


旋转机械振动测量框图





磁电速度传感器



接收形式：惯性式

变换形式：磁电效应

典型频率范围：10Hz~1000Hz

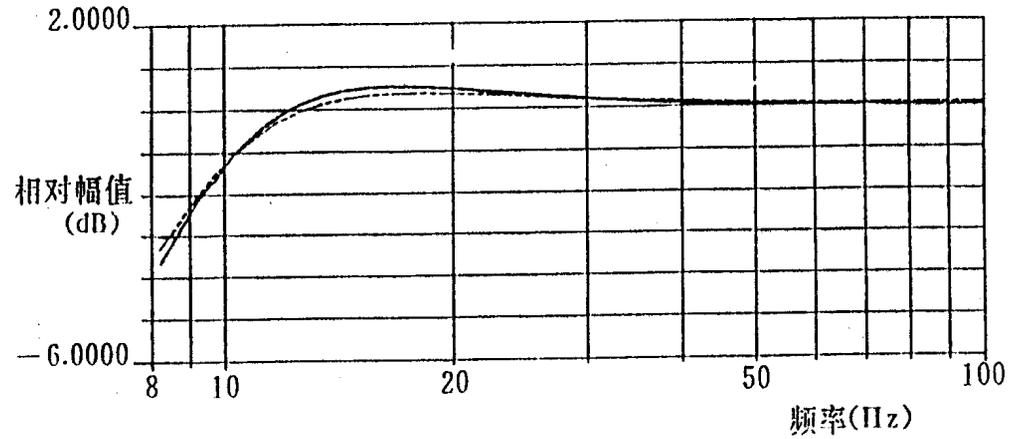
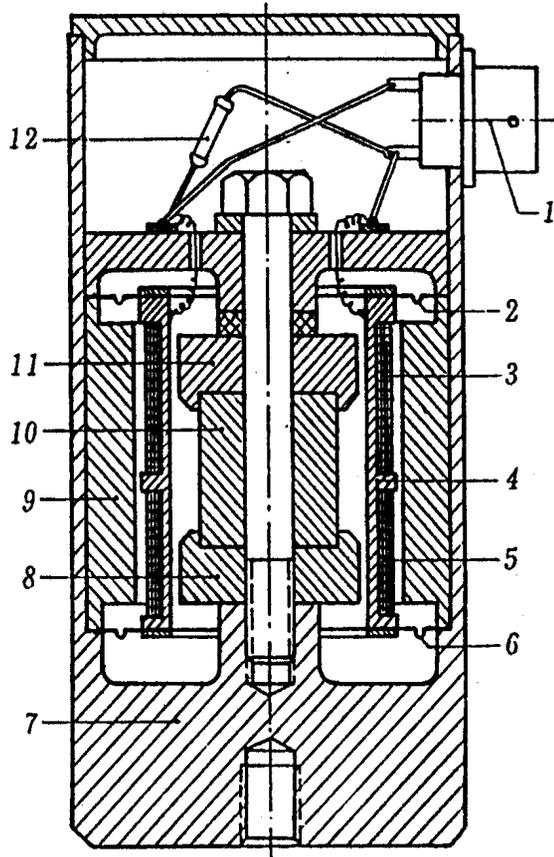
典型线性范围：0~2mm

典型灵敏度：20mV/mm/s

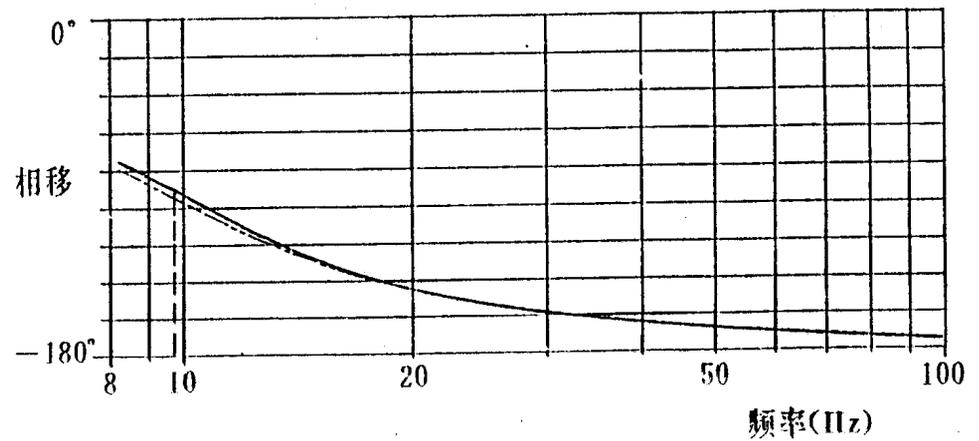
- 测量非转动部件的绝对振动的速度。
- 不适于测量瞬态振动和很快的变速过程。
- 输出阻抗低，抗干扰能力强。
- 传感器质量较大，对小型对象有影响。



典型的磁电速度传感器



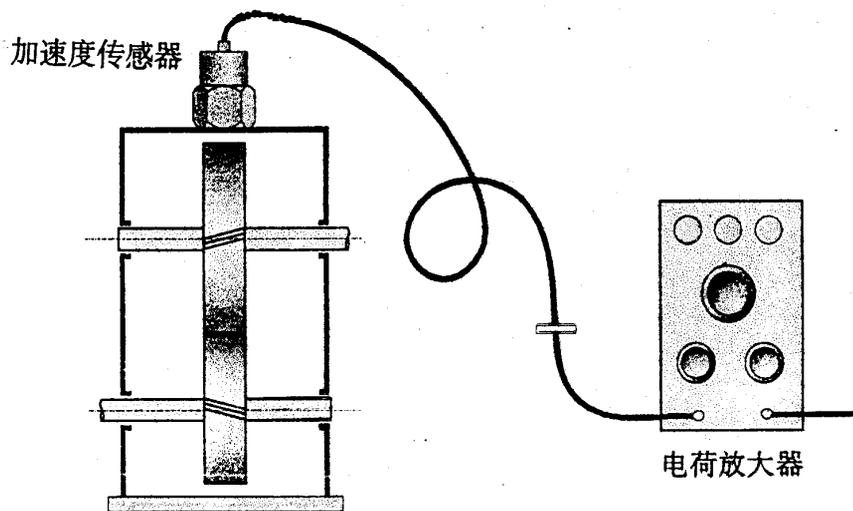
(a)



(b)



压电加速度传感器



接收形式：惯性式

变换形式：压电效应

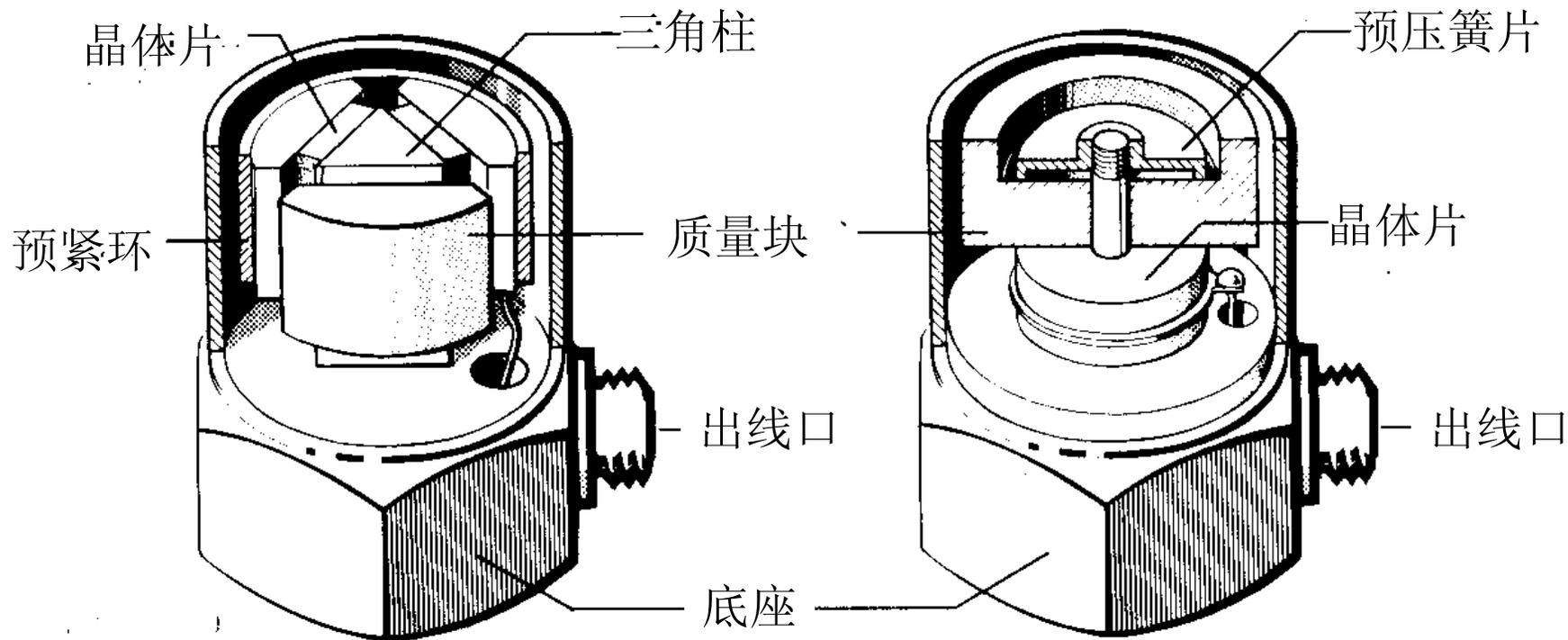
典型频率范围：0.2Hz~10kHz

线性范围和灵敏度随各种不同型号可在很大范围内变化。

- 测量非转动部件的绝对振动的加速度。
- 适应高频振动和瞬态振动的测量。
- 传感器质量小，可测很高振级。
- 现场测量要注意电磁场、声场和接地回路的干扰。



典型的压电加速度传感器

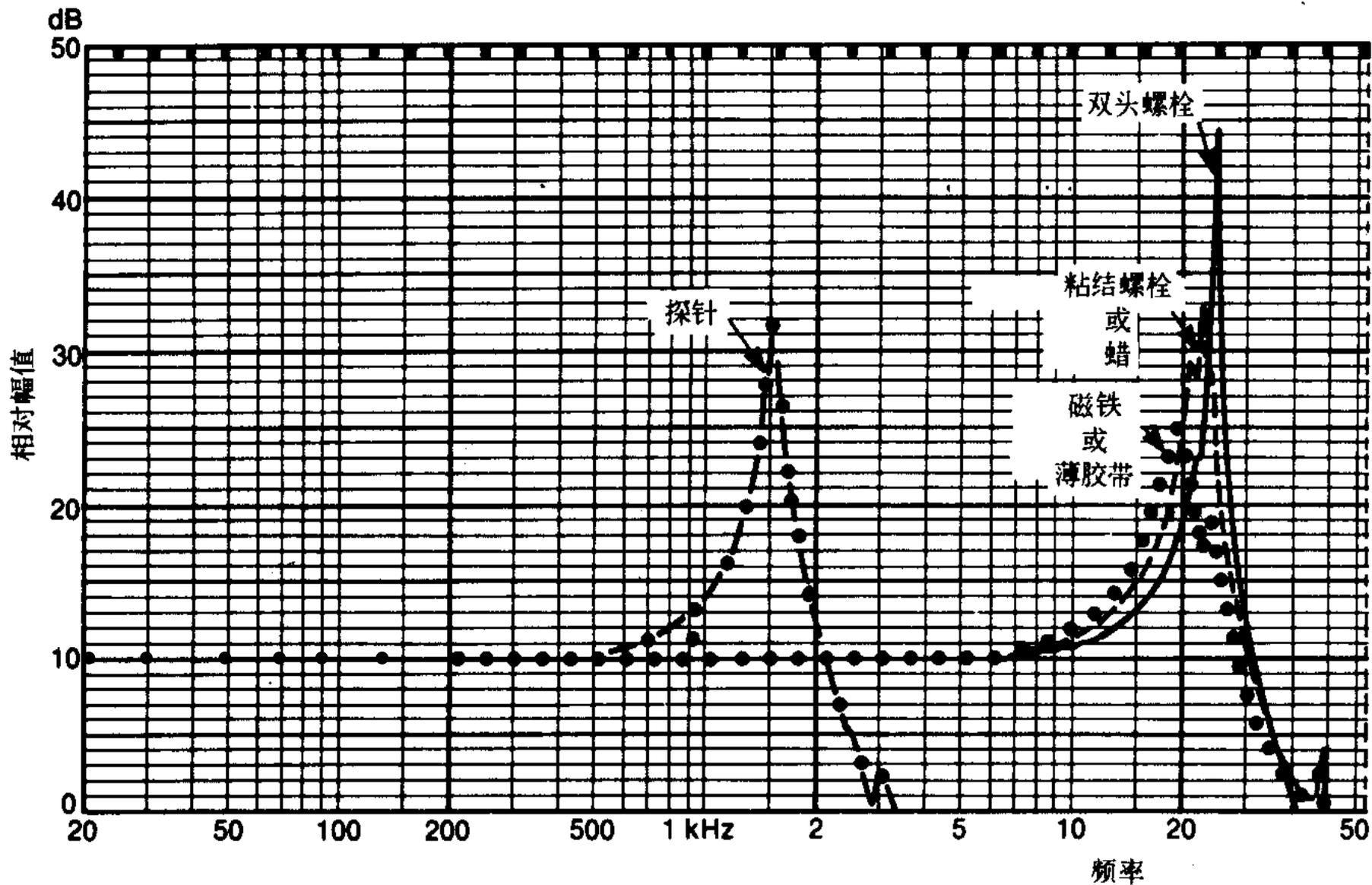


三角剪切型

中心压缩型

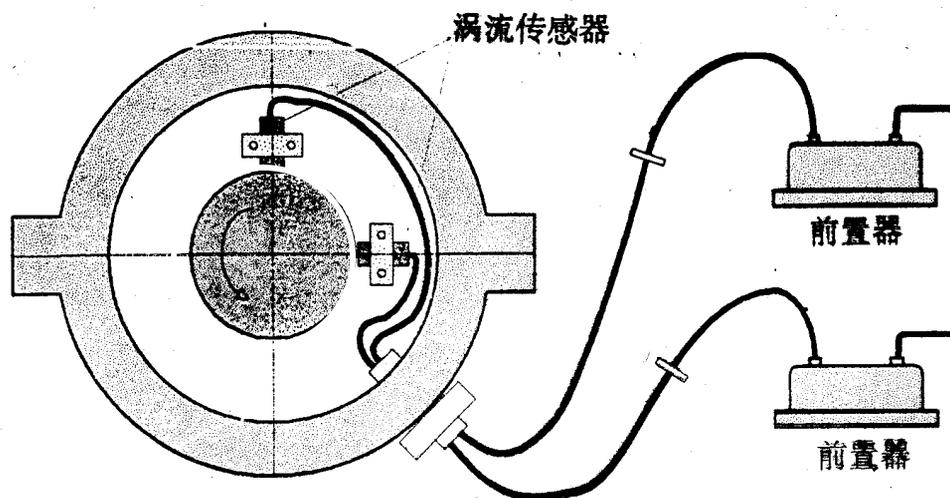


压电传感器的安装频率





涡流位移传感器



接收形式：相对式

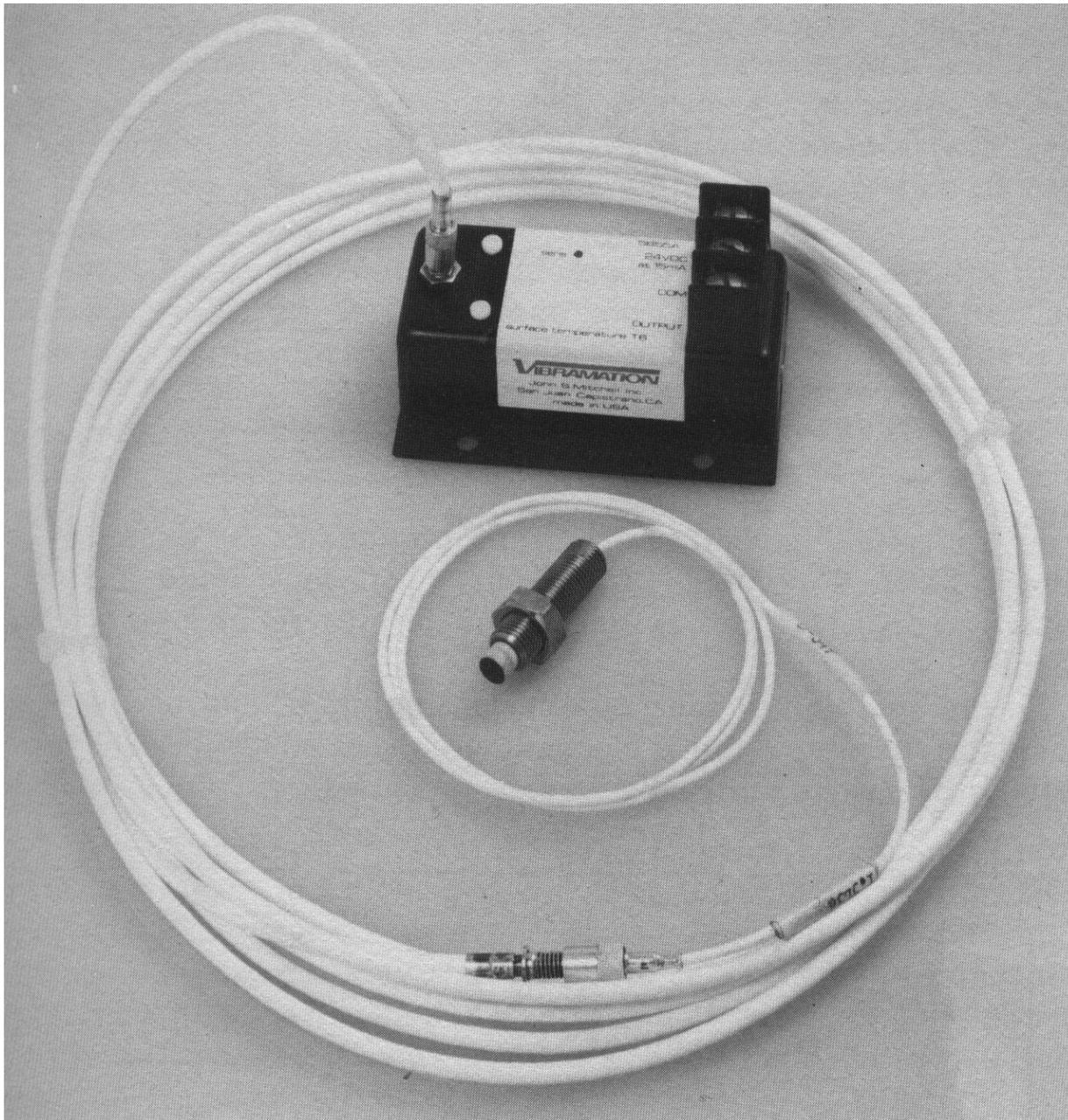
变换形式：电涡流

典型频率范围：0~20kHz

典型线性范围：0~2mm

典型灵敏度：8.0V/mm (对象为钢)

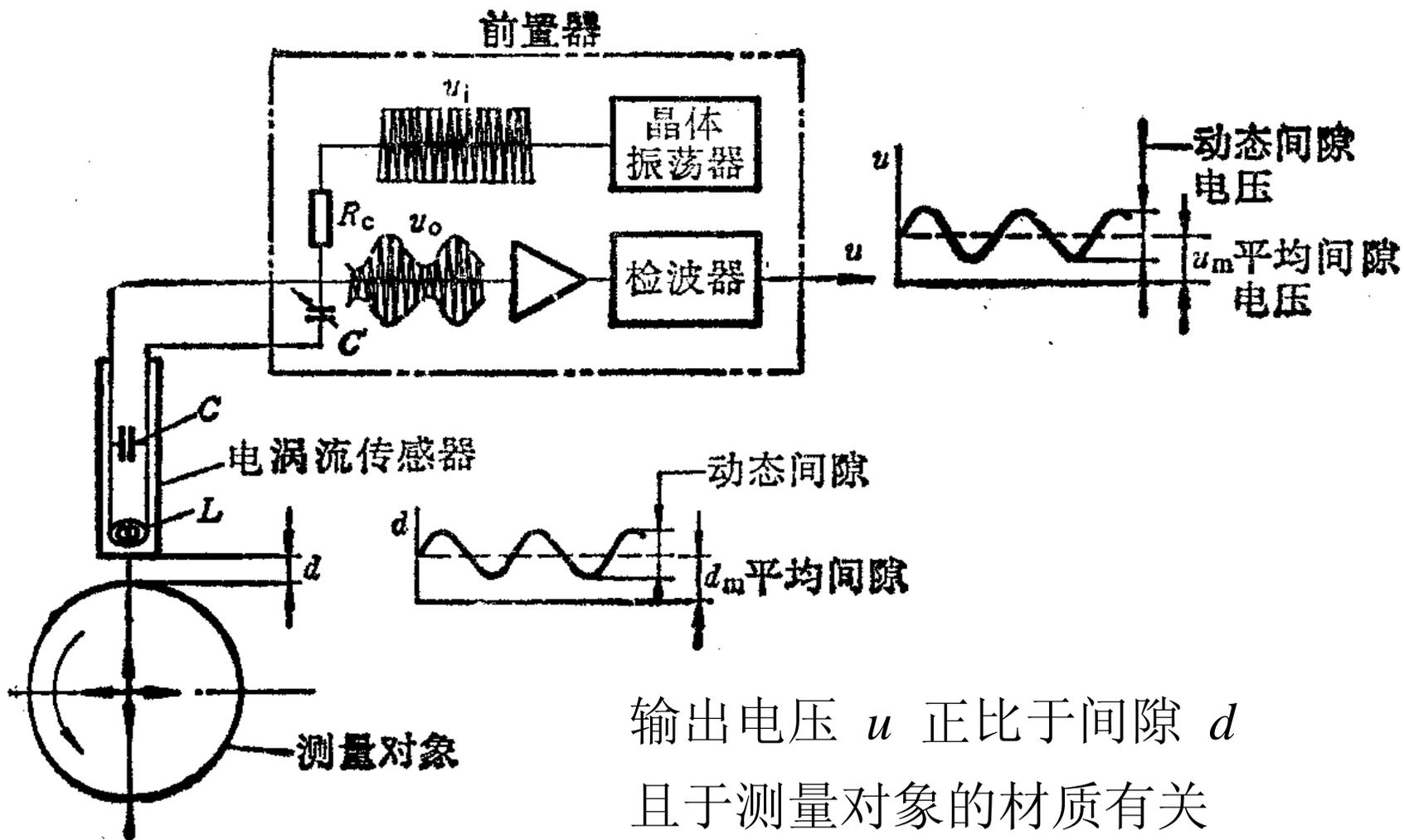
- 不接触测量，特别适合测量转轴和其他小型对象的相对位移。
- 有零频率响应，可测静态位移和轴承油膜厚度。
- 灵敏度与被测对象的电导率和导磁率有关。



涡流位移传感器 及其前置器



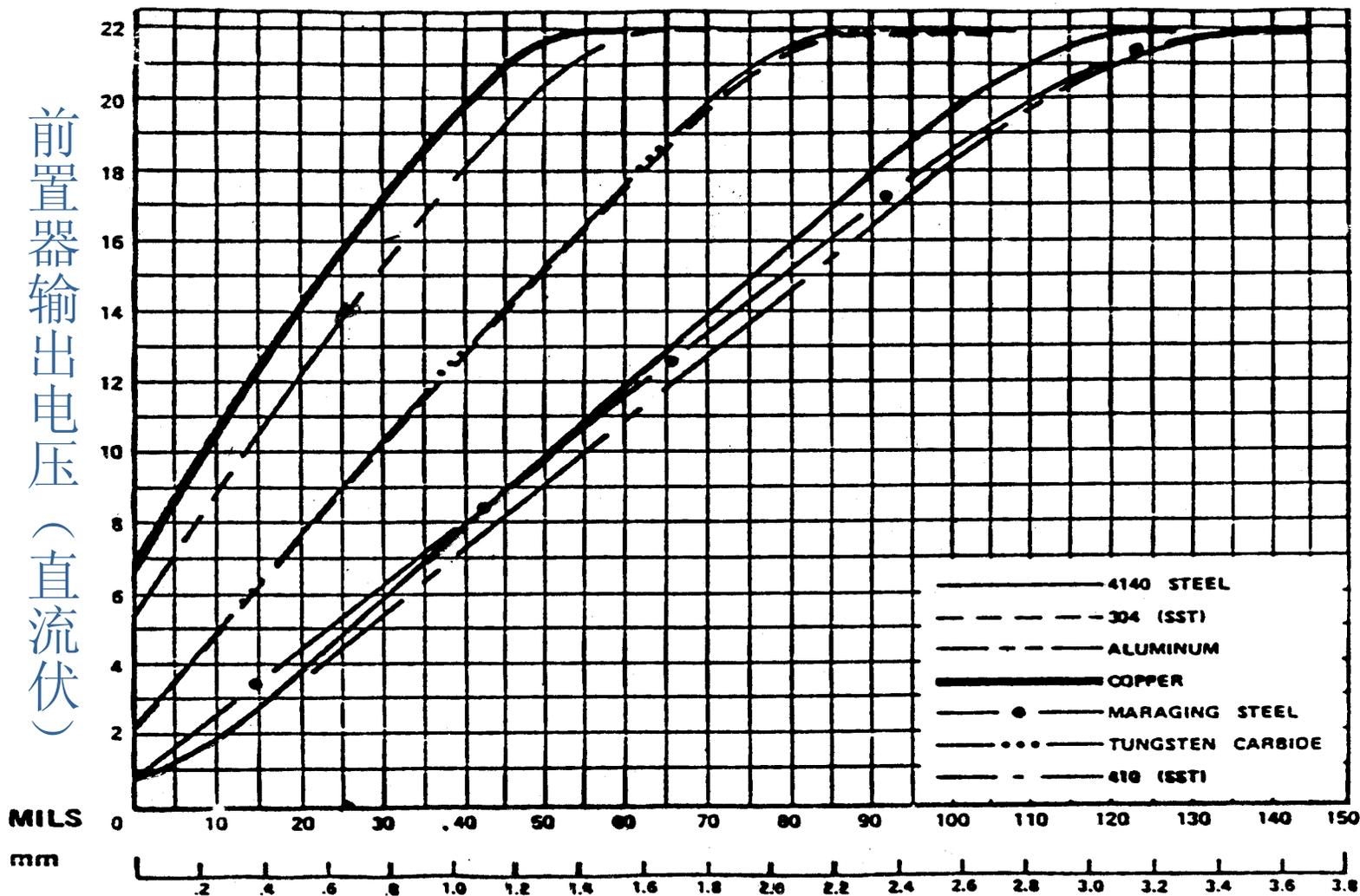
涡流传感器的工作原理



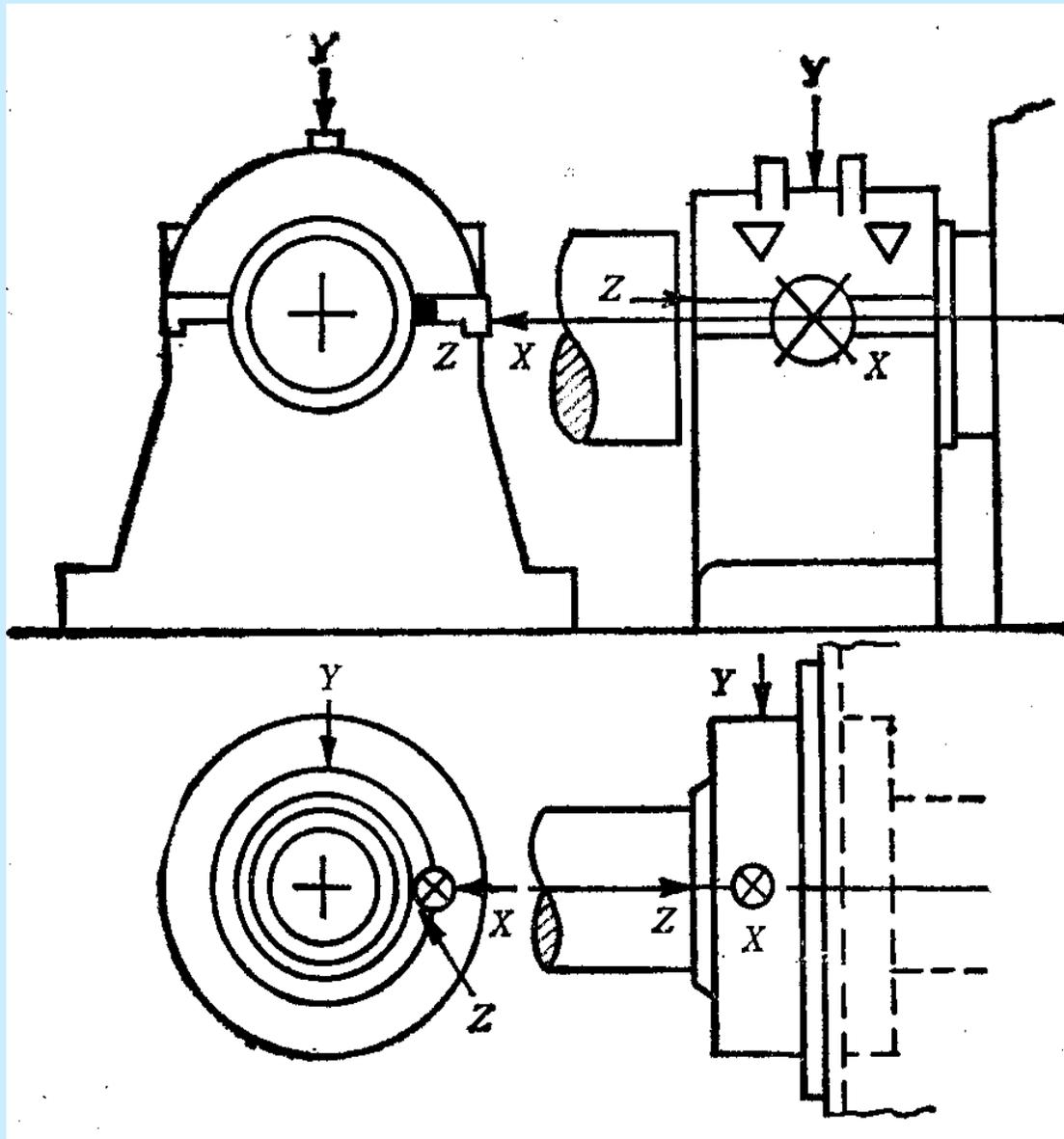


涡流位移传感器的特性

前置器输出电压
(直流伏)



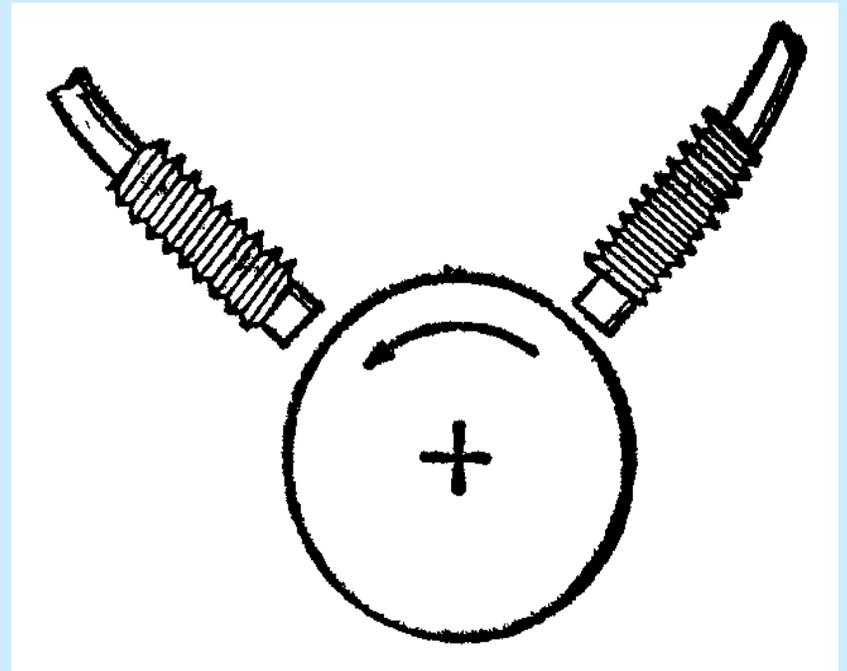
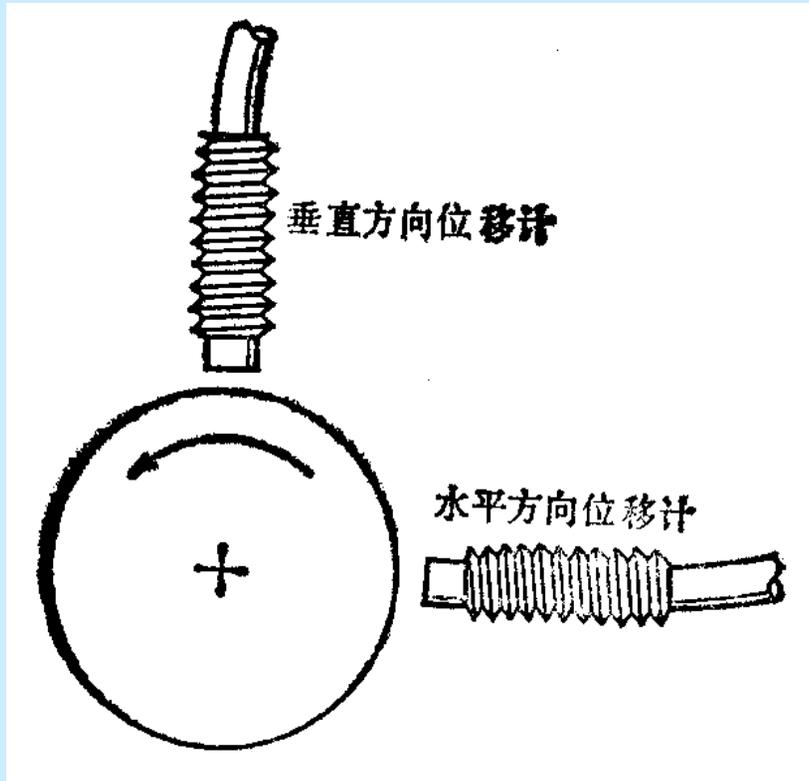
传感器与转轴之间的间隙



轴承振动的测点布置



轴振动的测点布置





轴承振动与轴振动的比较

	轴 承 振 动	轴 振 动
测量设备	<ul style="list-style-type: none">• 传感器易于安装、拆卸• 测定振动容易• 测量设备价格较低	<ul style="list-style-type: none">• 传感器安装受限制• 测定振动较轴承困难• 测量设备价格高
性能特点	<ul style="list-style-type: none">• 测振灵敏度小（当轴轻而本体刚度大时，对振动变化反映迟钝）• 有关参考资料丰富，掌握的限值范围广• 测量设备可靠性高	<ul style="list-style-type: none">• 测振灵敏度高（在任何情况下，对振动变化反映较灵敏）• 可直接测得基本界限值（如不平衡，轴内应力等）• 界限值不通用• 测量设备（特别是传感器）可靠性低
环境影响	<ul style="list-style-type: none">• 测量结果受周围环境的影响小	<ul style="list-style-type: none">• 测量结果受周围环境的影响大
应用场合	<ul style="list-style-type: none">• 监测机械的所有各种振动	<ul style="list-style-type: none">• 能得到更详细的关于转子的振动信息，可作高精度现场平衡数据

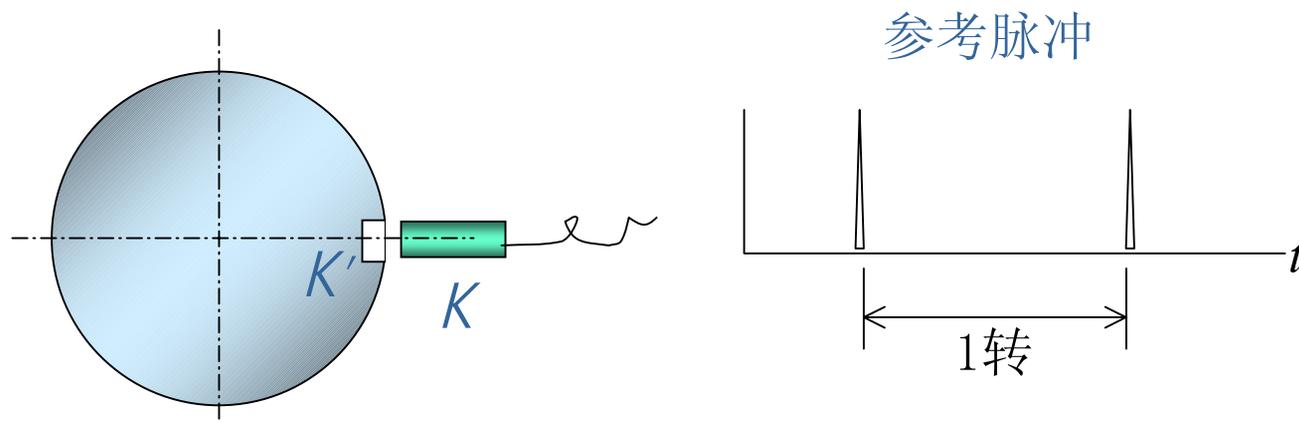


基频分量的幅值和相位

- 基频是转速频率，记作 $1 \times R$ 。
- 基频分量的幅值与转子的不平衡大小有关。
- 基频分量的相位与不平衡在转子上的方位有直接对应关系。
- 基频大小和相位由基频分析仪或频率分析方法求得。



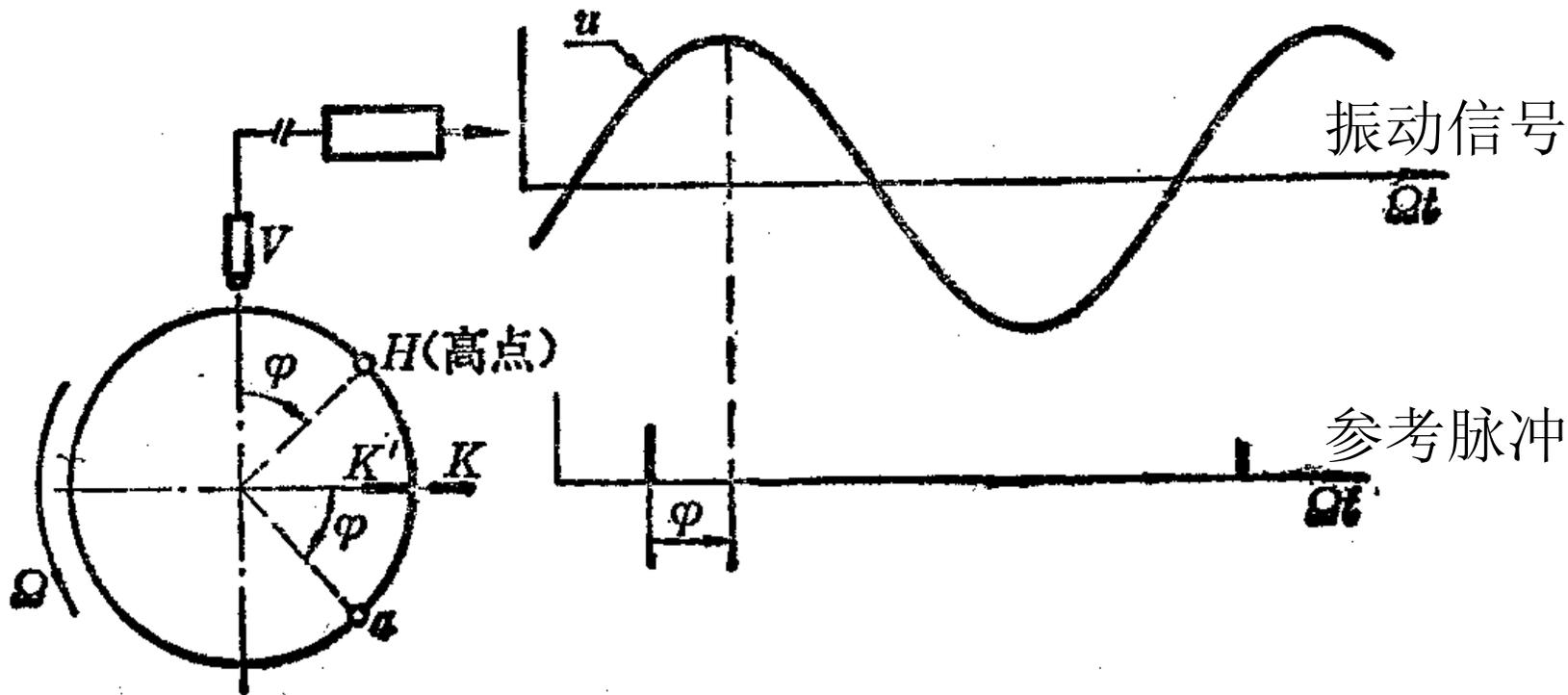
键相与相位参考脉冲



- 在转子上刻印键相标记 K' ，在轴承座上布置键相传感器 K （光电式或涡流式），其输出为相位参考脉冲。
- 参考脉冲是测量相位的基准。
- 参考脉冲也可用于测量转子的转速。



振动相位与转子转角的关系



- 从参考脉冲到第一个正峰值的转角 φ 定义振动相位。
- 振动相位与转子的转动角度一一对应。这在平衡和故障诊断中有重要作用。



旋转机械的振动图示 (定转速)

- **波形图 (Wave)**

时间域内的振动波形

- **频谱图 (Spectrum)**

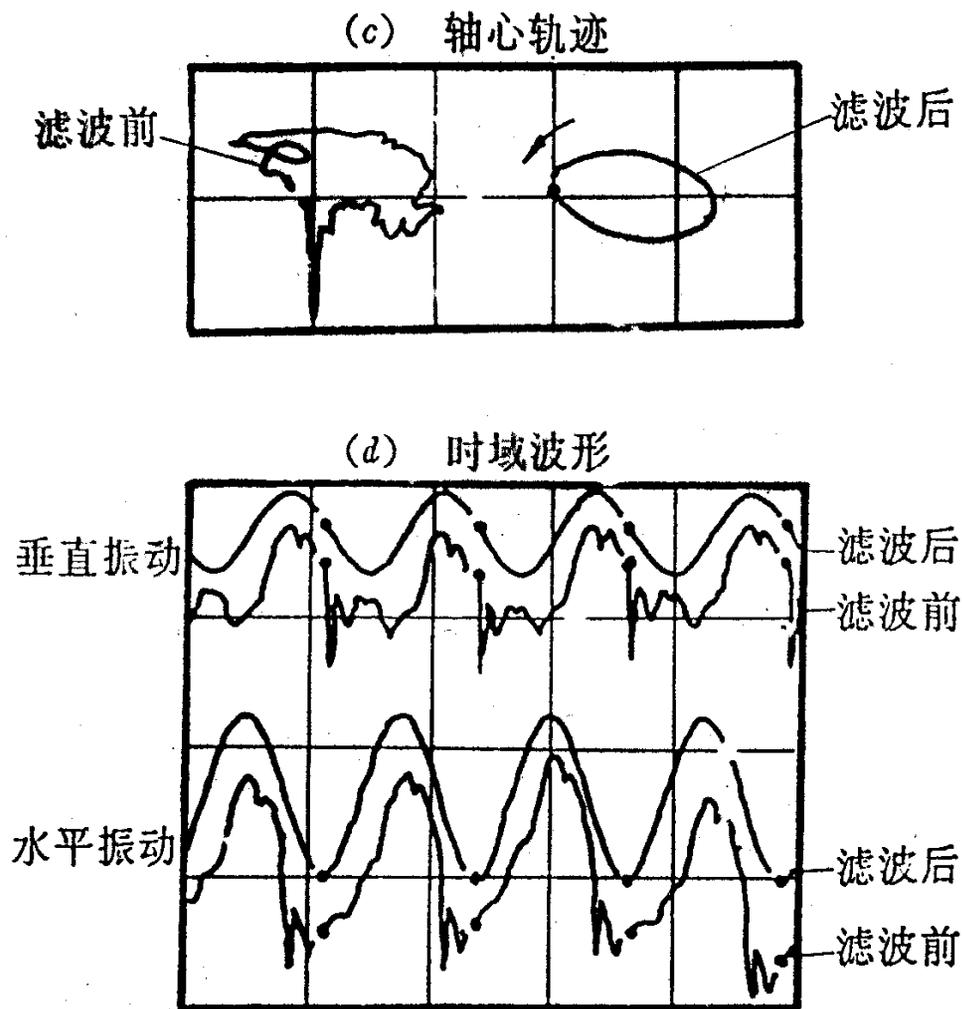
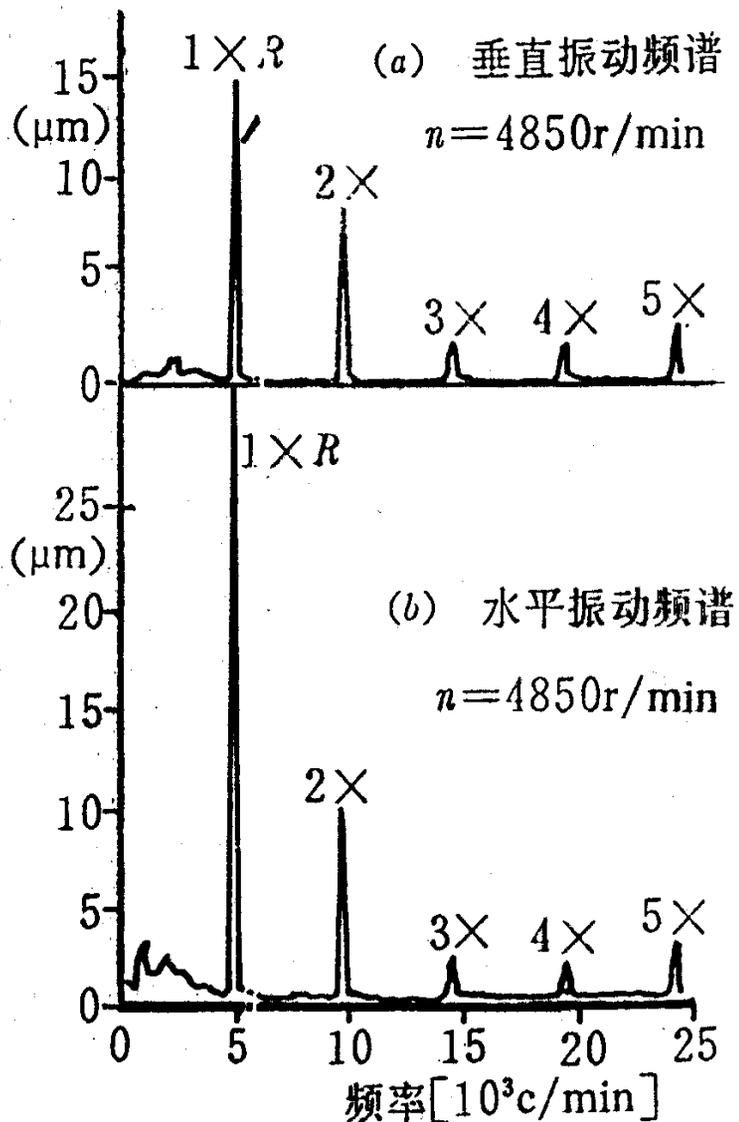
组成振动的各谐波成分

- **轴心轨迹 (Orbit)**

转轴中心的振动轨迹，由水平和铅垂两方向波形合成



波形图、频谱图及轴心轨迹





旋转机械的振动图示 (变转速)

- **轴心轨迹阵**

各转速下的轴心轨迹的组合

- **波德图与极坐标图 (Bode & Polar Plot)**

升（降）速时，基频幅值和相位的变化

- **三维频谱图 (Cascade)**

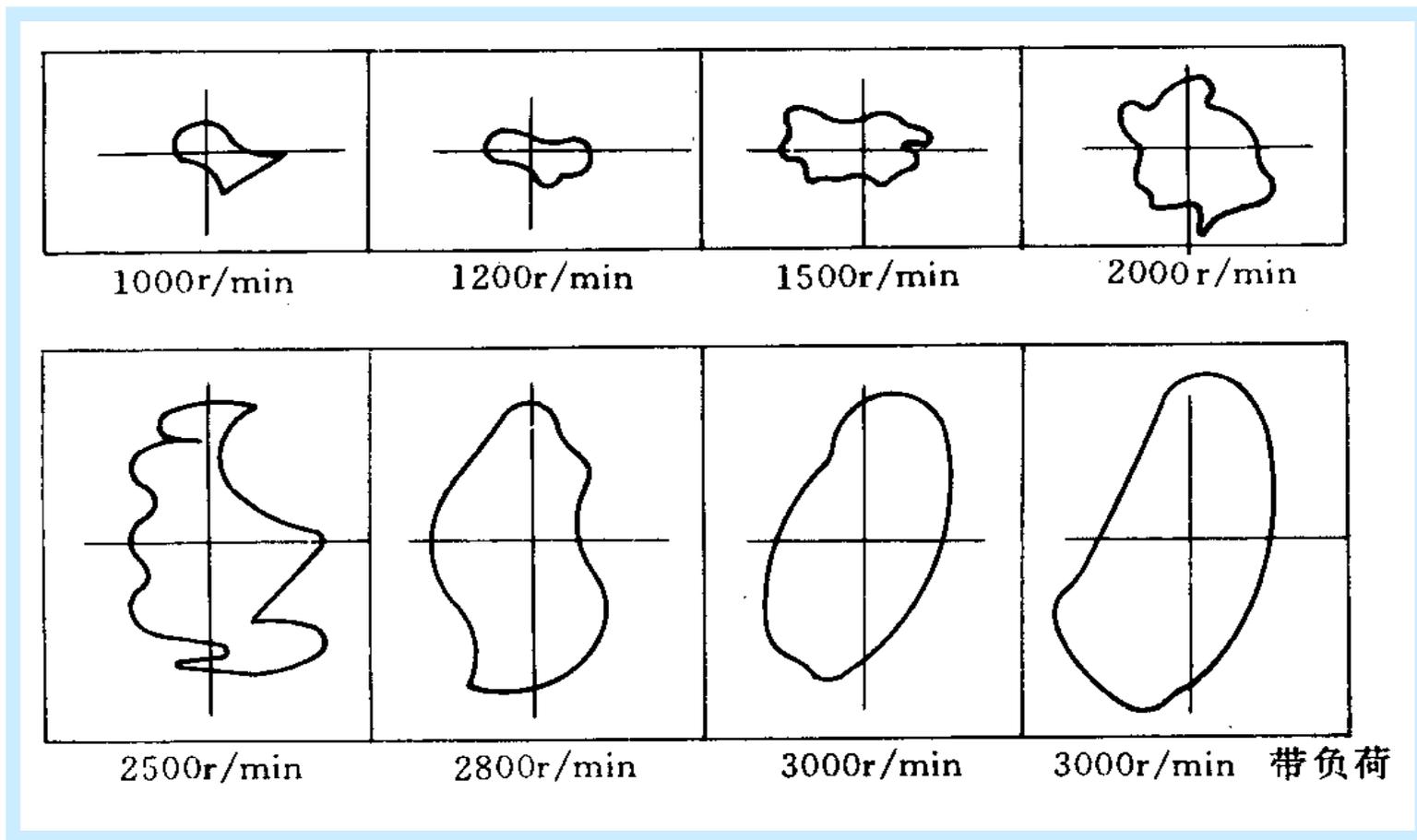
各转速下的频谱图的集合

- **轴心位置 (Shaft Center Position)**

判定轴颈静态工作点和油膜厚度



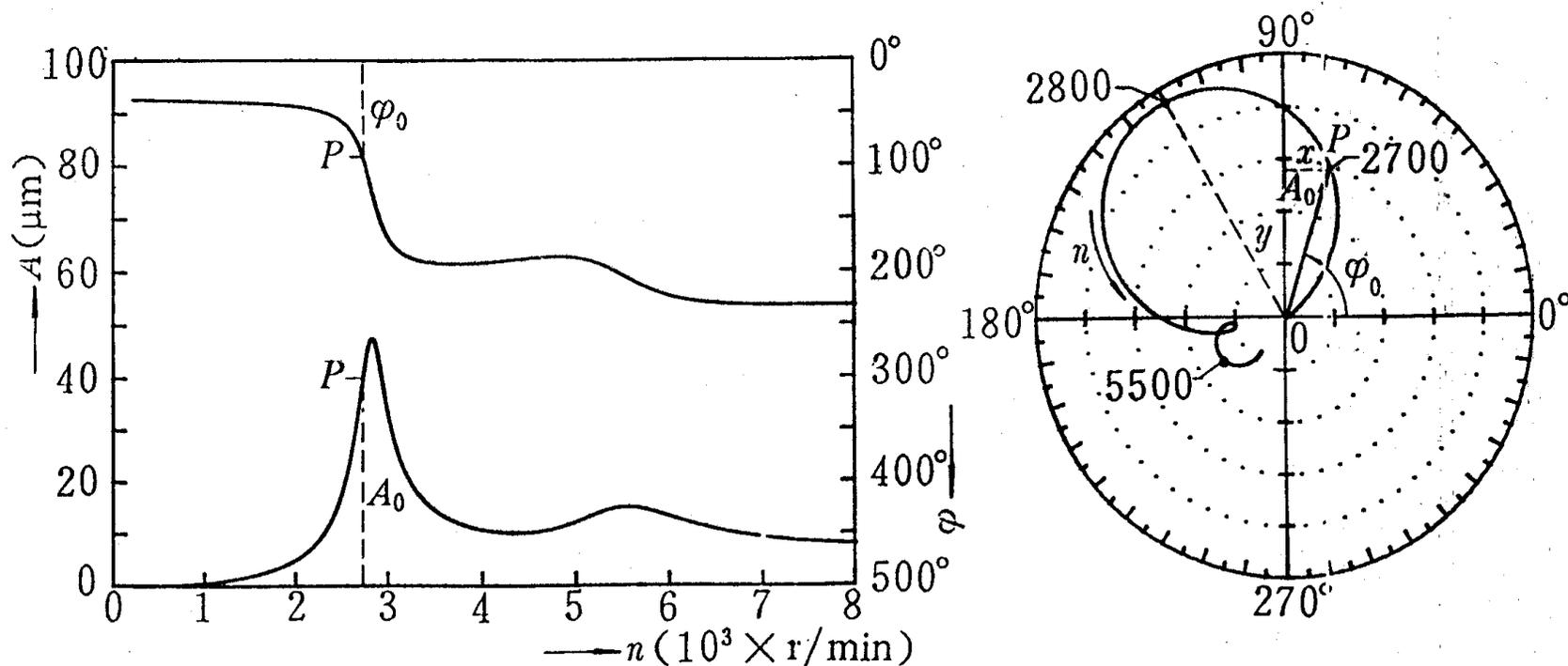
轴心轨迹阵图



汽轮发电机组一个轴承在不同转速下的轴心轨迹阵



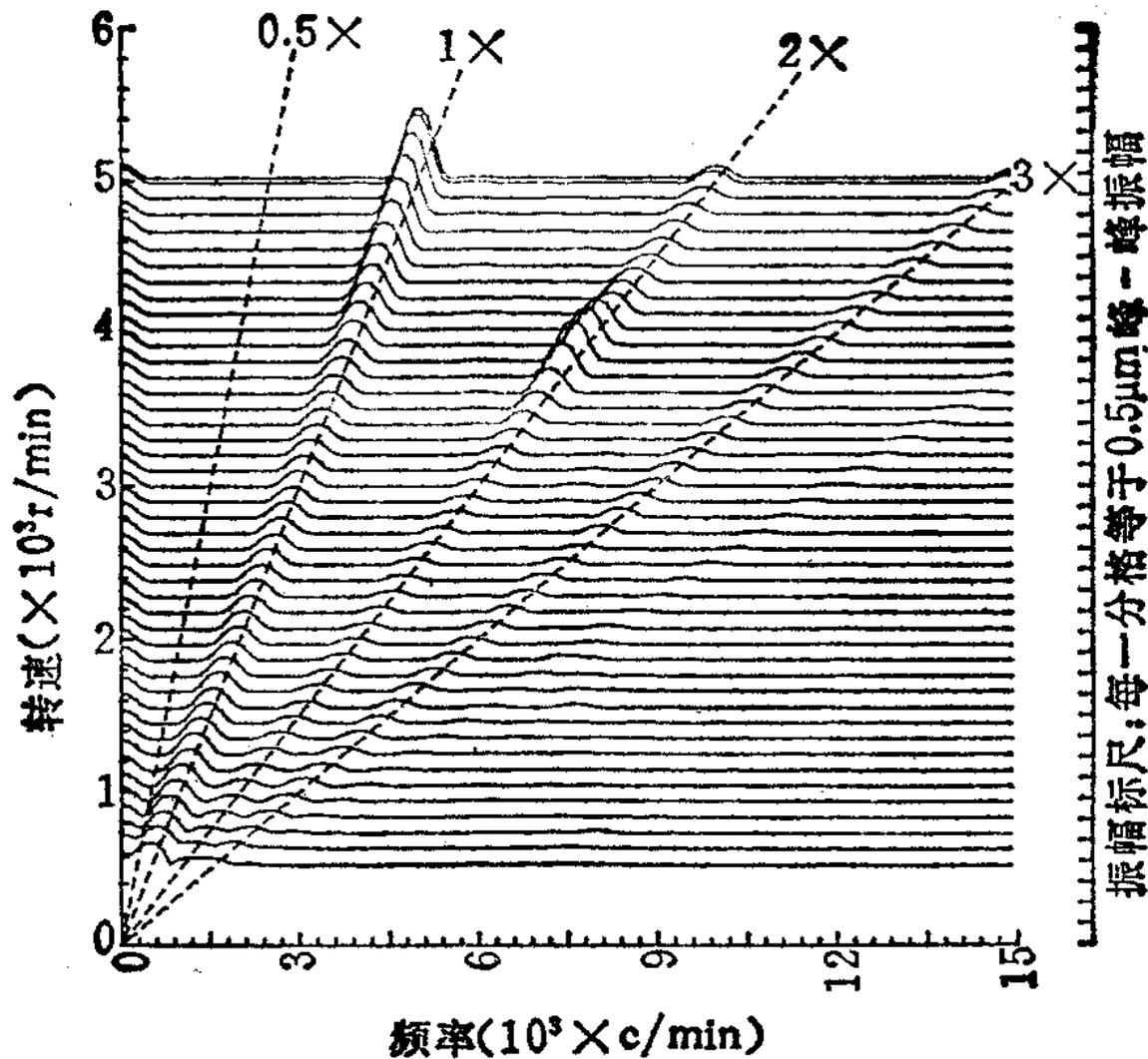
波德图和极坐标图



- 波德图(Bode Plot)和极坐标图(Polar Plot)两者所含信息相同，都表示基频振动的幅值和相位随机器转速的变化规律。



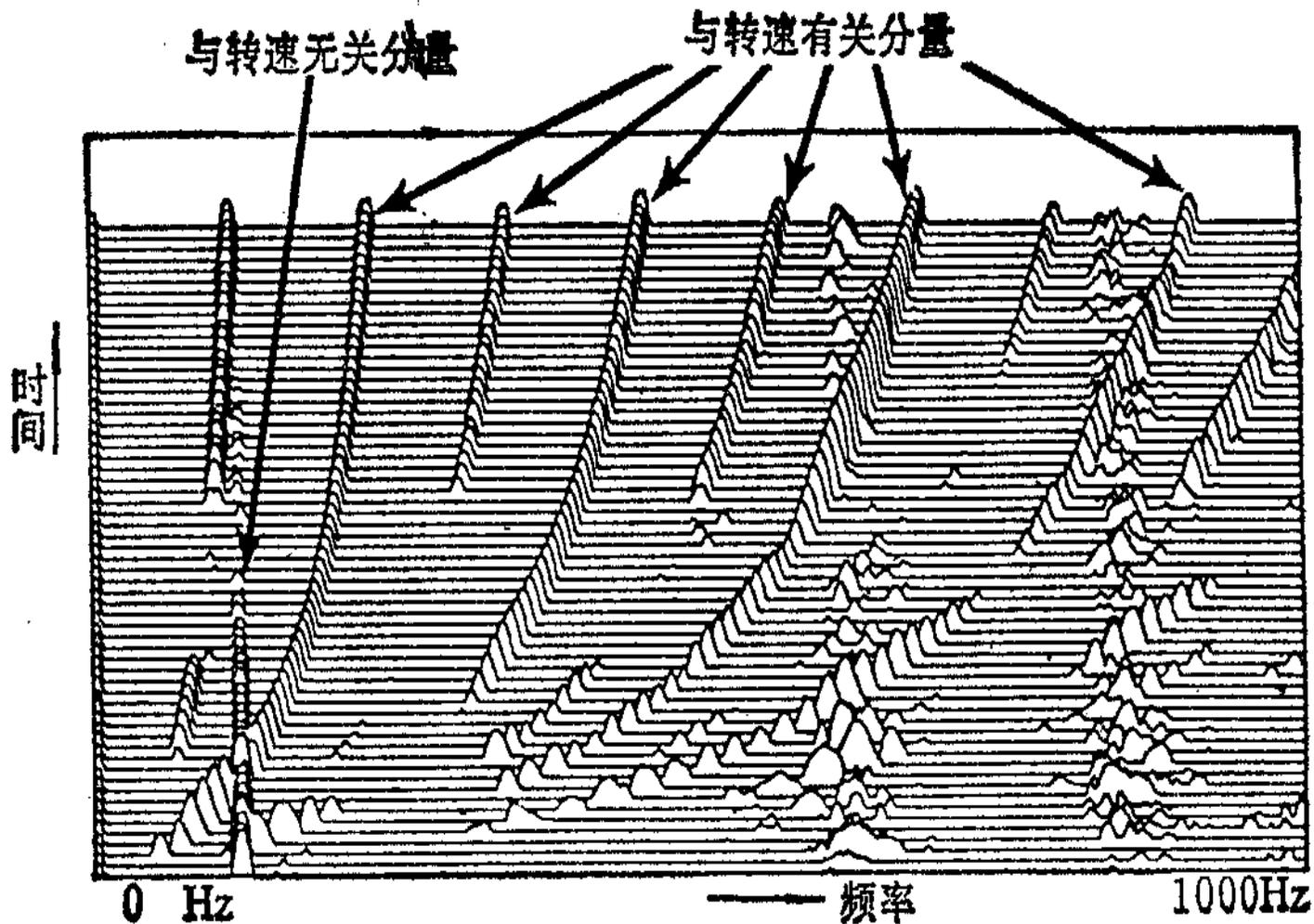
三维频谱图（谱阵图）



- 三维频谱图是频谱的集合。
- 它的第三个坐标是转速。
- 它表明在升、降速过程中振动频谱的变化。



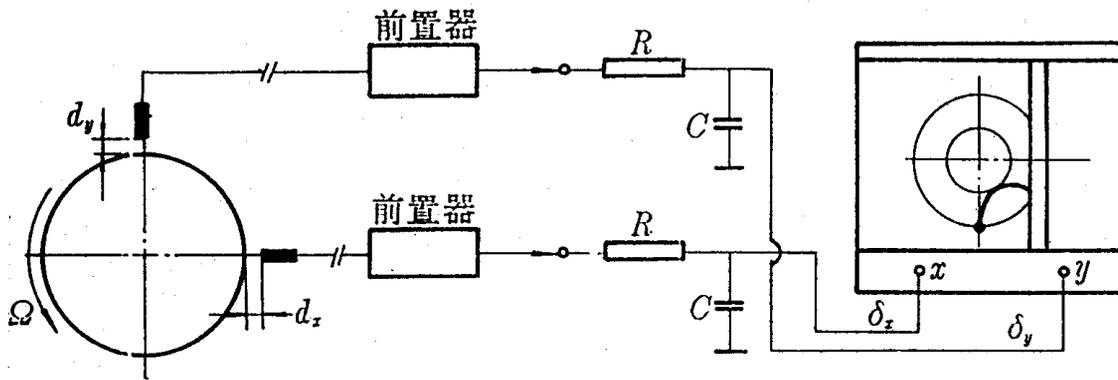
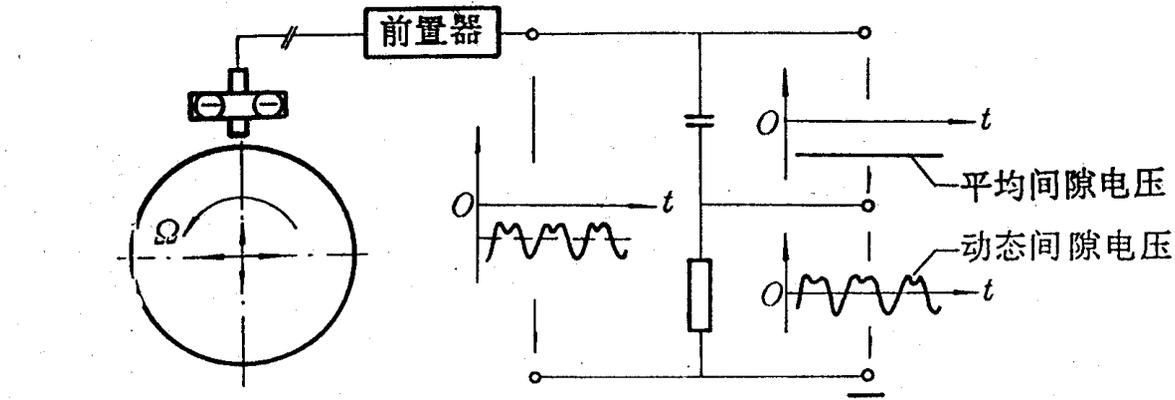
三维频谱图（谱阵图）



第三个坐标也可以是时间(日期)、工艺参数等。



轴心位置的测定



涡流传感器的
输出信号

动态
部分

静态
部分

间隙
变化

平均
间隙

轴心
轨迹

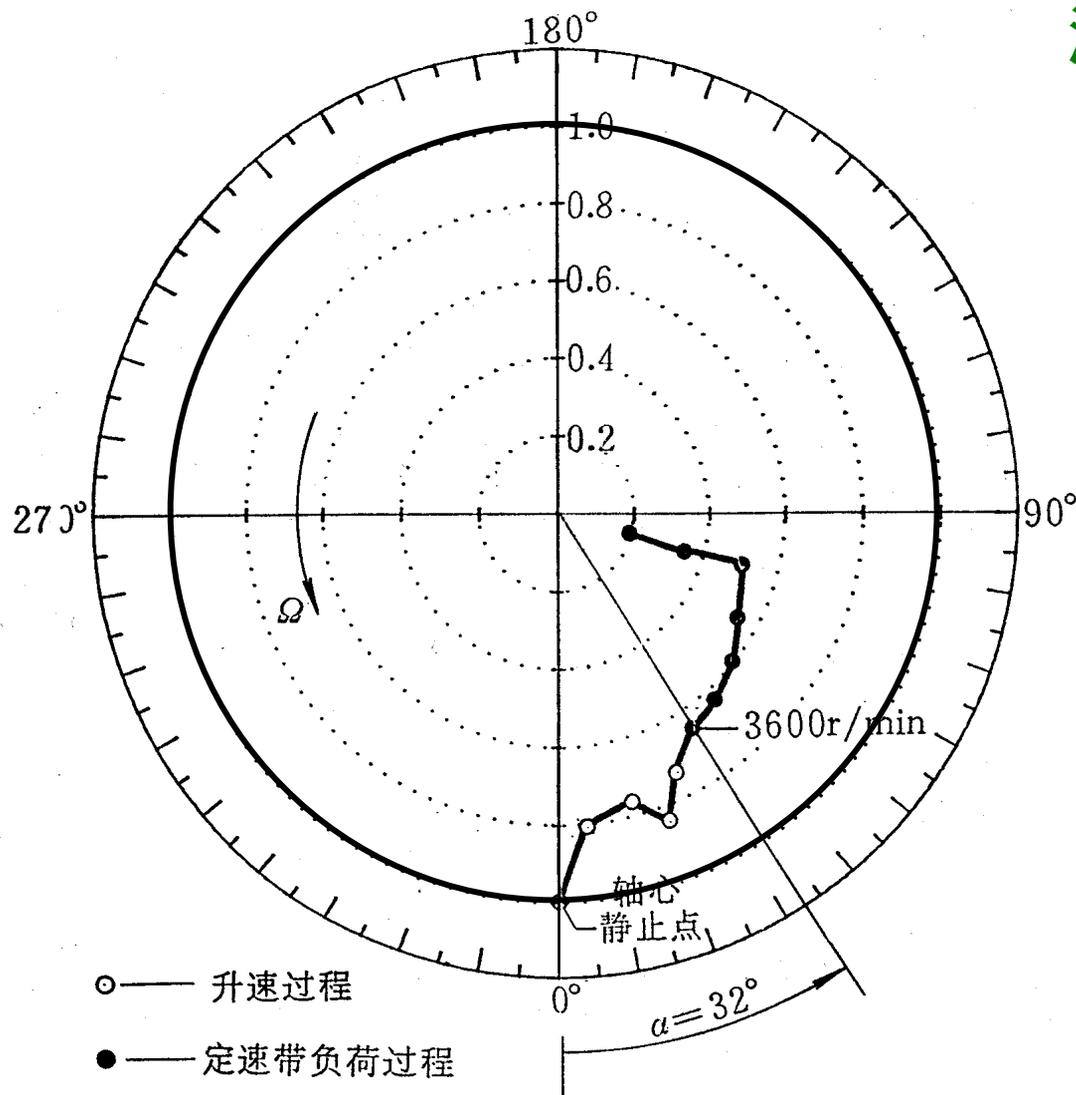
轴心
位置

- 轴心位置图可以用x-y记录仪或计算机来绘制。



从轴心位置的变化发现故障

汽轮发电机中压缸轴承



- 升速时轴心位置逐渐升高。
- 到工作转速时，偏心率为0.66；偏位角 32° 。属正常。
- 以后数月，轴承基础下沉，导致轴心上浮，偏心率减少，偏位角接近 90° 。
- 发生了油膜振荡。
- 监测轴心位置有助于发现机器的故障。



讲演到此结束

欢迎批评指正

